



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Geoinformatik

Entwicklung eines raumzeitlichen Informationsmodells zur Analyse der Kulturlandschaft und ihrer zeitlichen Veränderung

Thomas Ludwig Machl, M.Sc. (TUM)

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. ir. Walter Timo de Vries

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe
2. Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Thiemann
Universität der Bundeswehr München
3. Prof. Dr. agr. Hermann Auernhammer

Die Dissertation wurde am 06.05.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am 15.03.2021 angenommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konzeption, die Implementierung und den Aufbau eines zunächst anwendungsneutralen, skalenübergreifenden und raumzeitlichen Monitoringsystems für eine fortlaufende und landesweite Analyse verschiedener Fragestellungen im Kontext der Kulturlandschaft (sog. *LandModell^{TUM}*). Dieses Monitoringsystem setzt sich aus den drei Hauptkomponenten *Informationsmodell*, *datenbankbasiertes Informationssystem* sowie einer *Sammlung von Werkzeugen* zur Betrachtung diverser Aspekte der Landschaft (sog. *LandAnalyticsToolkit^{TUM}*) zusammen. Sämtliche der im Modell abgebildeten Elemente verstehen sich grundsätzlich als Plattform zur Fusion von Information unterschiedlicher Fachdisziplinen. Über den gemeinsamen Bezug interdisziplinärer Information auf identische Objekte wird eine integrierte Betrachtung verschiedener Phänomene der Realwelt wesentlich vereinfacht.

Den formal beschriebenen Kern des *LandModell^{TUM}* bildet ein objektorientiertes, mit Hilfe der Modellierungssprache UML beschriebenes und auf internationalen Normen der ISO 191xx Normenfamilie aufsetzendes Informationsmodell, welches grundlegende Konzepte und Komponenten abbildet. Bei der Ausgestaltung dieses Informationsmodells liegt ein wesentlicher Fokus auf einer umfassenden Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Weiterentwicklung einzelner Komponenten der Kulturlandschaft. Hierzu zählen neben einer Abbildung von Objektlebensdauern insbesondere auch die explizite Abbildung von Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen über die Zeit. Aufgrund einer expliziten und räumlich-semantic kleinteiligen Abbildung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit sowie auch aufgrund einer Historisierung von Objektzuständen über eine Versionierung von Attributen sind sämtliche Veränderungen für weiterführende Analysen zugänglich.

Das Informationsmodell ist modular aufgebaut und setzt sich aus einem Kernmodul und zwölf thematischen Paketen zusammen. Grundlegende Modellierungskonzepte mit Relevanz für sämtliche thematischen Pakete sind dabei im Kern-Modul abgebildet. Die thematischen Module behandeln die Aspekte landwirtschaftliche Flächennutzung, Transportbeziehungen in der Landwirtschaft, Eigentumsgrenzen sowie die Themenfelder Siedlung, Vegetation, Verkehr und Oberflächengewässer.

Für die Implementierung des Monitoringsystems wird das objektorientierte Informationsmodell auf die objektrelationale Struktur des Datenbankmanagementsystems PostgreSQL/PostGIS überführt. Innerhalb des Datenbanksystems werden dabei objektorientierte Konzepte weitestgehend übernommen oder anhand definierter Regeln nachgebildet. Die Semantik des Informationsmodells wird umfassend auf das Datenbanksystem übertragen.

Für den Aufbau des *datenbankbasierten Informationssystems* dienen jährlich und landesweit flächendeckend vorliegende Geodatenbestände verschiedener Quellen für die Jahre 2010 bis 2018. Das System ist dabei jedoch grundsätzlich für eine fortlaufende Fortschreibung ausgelegt. Als Datengrundlage dienen neben mehrjährigen Daten der Landwirtschaftsverwaltung insbesondere auch jährliche Zeitscheiben verschiedener Datensätze der

Amtlichen Vermessungsverwaltung. Diese werden mit Hilfe von eigens entwickelten, automatisierten Geoverarbeitungsketten in das System integriert und dabei in die Struktur des LandModell^{TUM} überführt.

Ein generelles Konzept des LandModell^{TUM} besteht in einer unmittelbaren Kopplung des Modells mit Werkzeugen des LandAnalyticsToolkit^{TUM}, welche sich jeweils mit verschiedenen Aspekte der Kulturlandschaft auseinandersetzen. Diese Werkzeuge greifen auf die im Informationssystem abgebildeten Objekte zu, verarbeiten diese und führen die in den Analysen gewonnenen Informationen entsprechend dem Konzept der semantischen Anreicherung zurück zu den betreffenden Objekten. Damit stehen sämtliche, in den Analysen gewonnenen Informationen auf Ebene von Einzelobjekten für weiterführende Analysen zur Verfügung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind fünf Werkzeuge zur landesweiten Betrachtung folgender Aspekte umgesetzt:

1. Werkzeug zur Ableitung von Lebensdauern, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit aus Abfolgen von jährlichen Schnappschüssen heterogener Datenbestände
2. Werkzeug zur parametrischen Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen
3. Werkzeug zur Ableitung von Transportpfaden zwischen Parzellen und Hofstellen
4. Werkzeug zur Analyse und Bewertung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrsnetz
5. Werkzeug zur Ableitung objektiver Planungsgrundlagen für die Konzeption bedarfsge rechter und transregionaler Kernwegesysteme für die Landwirtschaft

Abstract

This thesis describes the design, implementation and establishment of an application-independent, cross-scale and spatio-temporal monitoring system for a continuous and nationwide analysis of different aspects of the cultural landscape (so-called *LandModel^{TUM}*). This monitoring system consists of the three main components *information model*, *information system*, and a *collection of tools* addressing various thematic aspects (so-called *LandAnalyticsToolkit^{TUM}*). All of the elements represented in the model are considered to be a platform for the fusion of information from different disciplines. Due to the common referencing of interdisciplinary information to identical objects, an integrated view on different phenomena of the real world is considerably simplified.

The formally described core of the *LandModel^{TUM}* is an object-oriented information model defining fundamental concepts and components of the cultural landscape. It is specified using the modeling language UML and based on international standards of the ISO 191xx family of standards. The design of the information model addresses various facets of the temporal evolution of individual landscape components. This includes not only the modeling of object lifetimes, but also the explicit representation of state changes and cross-object transitions over time. Due to an explicit and spatially as well as semantically detailed representation of transitions between objects over time, as well as due to a historization of object states via a versioning of attributes, all changes are accessible for further analyses.

The information model has a modular structure and consists of a core module and twelve thematic packages. Basic modeling concepts relevant to all thematic packages are represented in the core module. The thematic modules deal with the aspects of agricultural land use, transportation in agriculture as well as the thematic aspects property boundaries, settlement, vegetation, traffic area, and surface water.

For the implementation of the monitoring system the object-oriented information model is implemented in the object-relational database management system PostgreSQL/PostGIS. Within the database system, object-oriented concepts of the model are adopted as far as possible or mapped using defined rules. The semantics of the information model are transferred comprehensively to the database system.

For the development of the *information system* annually and nationwide available geospatial datasets from different sources are used for the years 2010 to 2018. In addition to annual data sets from the Agricultural Administration, data sets from the State Mapping Agency provide the basis for the development of the spatio-temporal information system. All the data are integrated into the system and transformed into the structure of the *LandModel^{TUM}* using automated geoprocessing chains.

A core concept of the *LandModel^{TUM}* is the close coupling of the model with methods of the *LandAnalyticsToolkit^{TUM}*, which analyse different aspects of the cultural landscape. These tools access and process the objects represented in the information system and route the information obtained in the analyses back to the specific objects according to the concept of

semantic enrichment. In this way, all the information gained in the analyses is available for further analyses at the level of individual objects.

In this thesis, five tools for the nationwide analysis of the following aspects are implemented:

1. methods for extracting lifetimes, changes of state and cross-object transitions between objects over time from sequences of annual snapshots of heterogeneous data sets
2. methods for the parametric description of the shape of agricultural parcels
3. methods for deriving transportation paths between agricultural plots and farms
4. methods for analysis and evaluation of the connectivity of agricultural parcels to the supraregional transport network
5. methods for providing basic planning information for the conception of demand-oriented and trans-regional core road systems for agriculture

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand größtenteils während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität. Wesentliche Grundlage dieser Arbeit bildet das von der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung geförderte Forschungsprojekt *Entwicklung eines semantischen Landmodells zur Analyse raum-zeitlicher Veränderungsprozesse in der Agrarlandschaft (LandModell^{TUM})*.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe, der mir als Mentor dieser Arbeit jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mir gleichzeitig für die thematische Ausgestaltung des Projekts LandModell^{TUM} einen großen wissenschaftlichen Freiraum zugestand. Seine Erfahrungen aus der Konzeption des internationalen OGC[®]-Standard CityGML flossen an vielen Stellen in die Ausgestaltung des LandModell^{TUM} ein. Herzlichen Dank für die äußerst hilfreichen Ratschläge und Hinweise zu den verschiedenen Facetten des Projekts, die ausgesprochen konstruktiven Fachdiskussionen sowie die langjährige und außerordentlich fruchtbare Zusammenarbeit am Lehrstuhl für Geoinformatik! Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Thiemann sehr für seine Bereitschaft, die vorliegende Arbeit aus der Perspektive der Landentwicklung und der Flurneuordnung zu begutachten. Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. agr. Hermann Auernhammer für die langjährige Begleitung des Projekts LandModell^{TUM}, die zahlreichen und äußerst wertvollen Fachgespräche sowie die Begutachtung der vorliegenden Arbeit aus Sicht der Agrarwissenschaften. Für die Leitung der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr. ir. Walter de Vries sehr herzlich.

Darüber hinaus gilt mein außerordentlicher Dank Herrn Wolfgang Ewald, Frau Barbara Donaubaue, Herrn Dr.-Ing. Herbert Daschel, die von Seiten der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung des StMELF das Projekt LandModell^{TUM} überhaupt erst möglich gemacht haben. Vielen herzlichen Dank für die Finanzierung, Unterstützung, Begleitung und die Möglichkeit zur agilen Weiterentwicklung des Forschungsprojekts.

Ebenso möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen und Koordinator des LandModell^{TUM} am Lehrstuhl für Geoinformatik, Herrn Dr.-Ing. Andreas Donaubaue, für die wertvollen Hinweise und die konstruktive Begleitung des Projekts bedanken. Vielen herzlichen Dank für die langjährige, gute Zusammenarbeit im GIS-Labor am Campus Weihenstephan. Bei Fragen zur Ausgestaltung des Informationsmodells stand mir meine Kollegin Frau Dr. rer. nat. Tatjana Kutzner mit konstruktiven Tipps zur Seite: herzlichen Dank!

Die Arbeit wäre zudem ohne weitere Partner undenkbar gewesen. Mein Dank geht daher an Herrn Jürgen Eisentraut und Herrn Robert Bromma vom Amt für Ländliche Entwicklung Unterfranken für die fruchtbare Zusammenarbeit im Modellprojekt NES-Allianz und das wertvolle Feedback im Zusammenhang mit der Konzeption von Kernwegesystemen. Ebenso herzlichen Dank an Frau Stephanie Göbet und Herrn Steffen Moninger für die intensive Begleitung des Modellprojekts NES-Allianz seitens der BBV-LandSiedlung Würzburg sowie an Herrn Michael Diestel vom BBV, die Bürgermeister und Landwirte des ILE-Region NES Allianz für die Unterstützung des Teilprojekts. Darüber hinaus herzlichen Dank an Frau Mar-

tina Halama, Herrn Dr. agr. Xaver Zenger, Herrn Robert Brandhuber sowie Herrn Anton Dippold, die das Projekt LandModell^{TUM} von Anfang an seitens der Landwirtschaftsverwaltung begleiteten und mir mit wertvollen Tipps zur Seite standen. Ein großes Dankeschön gilt auch all meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Geoinformatik, am TUM-Zentralinstitut Hans Eisenmann-Forum für Agrarwissenschaften sowie an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, die mich nach Kräften unterstützt haben. Namentlich seien an dieser Stelle insbesondere Frau Claudia Luksch und Frau Dr. agr. Margit v. Lützwow erwähnt, die mir hilfreiche Tipps für die Ausgestaltung der Arbeit gaben.

Einige Teilaspekte des Projekt wurden zudem von studentischen Arbeiten begleitet, die sich mit einzelnen Teilaspekten des LandModell^{TUM} auseinandersetzen. Ich möchte mich daher ausdrücklich bei Frau Christina Astner, Frau Nicole Hagspiel, Herrn Gerhard Fischl, Herrn Kilian Gapp und Herrn Sebastian Gerl für die Bearbeitung begleitender Teilaspekte des Projekts bedanken.

Mein außerordentlicher Dank gebührt allerdings meiner Familie, die mir jederzeit zur Seite stand, mich stets wieder aufs Neue ermutigte und auch immer Verständnis für so manche Nachtschicht oder so manches durchgearbeitete Wochenende gezeigt oder dies - zumindest weitestgehend kommentarlos - hingenommen hat: herzlichen Dank meinen Eltern, Karola und Konrad Machl, sowie auch Barbara, Emilie und Markus.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XXIII
Listingverzeichnis	XXIV
Abkürzungsverzeichnis	XXVII
1 Einleitung	1
1.1 Begriff Kulturlandschaft im Kontext des LandModell ^{TUM}	3
1.2 Zentrale Forschungsfragen dieser Arbeit	4
1.3 Aufbau und Inhalt der Arbeit	5
I LandModell^{TUM} - ein raumzeitliches Modell der Kulturlandschaft	7
2 Anwendungsbereiche des LandModell^{TUM} und resultierende Anforderungen	9
2.1 Monitoring von Veränderungen der Kulturlandschaft	9
2.2 Landesweites Monitoring regionaler Parzellenstrukturen in der Landwirtschaft	10
2.3 Analyse landwirtschaftlicher Transportpfade	10
2.4 Flurneuordnung und ländlicher Wegebau	11
2.5 Agrarökologie	12
2.6 Fazit: Anforderungen an die Ausgestaltung des LandModell ^{TUM}	12
2.6.1 Abbildung grundlegender und stabiler Objekte	12
2.6.2 Umfassende Abbildung verschiedener Facetten einer zeitlichen Weiterentwicklung von Objekten	13
2.6.3 Semantische Anreicherung des Modells	14
2.6.4 Abbildung topologischer Beziehungen	14
2.6.5 Abbildung statistischer Aggregationseinheiten	14
3 Grundlagen zur raumzeitlichen Modellierung der Kulturlandschaft	17
3.1 Standard- und normbasierte Modellierung von Geoinformation	17
3.2 Zeit und Geoinformation	19
3.2.1 Grundlegende Eigenschaften des Phänomens Zeit	19
3.2.2 Konzepte zur Historisierung von Geoobjekten	20
3.2.3 Konzepte zur Versionierung von Objektzuständen	22

3.2.4	Konzepte zur Repräsentation von Übergangsbeziehungen zwischen Geobjekten über die Zeit	23
3.2.5	Internationale Normen zur Modellierung der Dimension Zeit im Zusammenhang mit Geoinformation	25
3.2.6	Zwischenfazit	26
3.3	Ausgewählte Informationsmodelle zur Repräsentation der Kulturlandschaft	27
3.3.1	ISO 19152:2013-03 Land Administration Domain Model (LADM)	28
3.3.2	Internationaler OGC [®] -Standard CityGML	29
3.3.3	INSPIRE-Richtlinie	33
3.3.4	AAA [®] -Modellierung	35
3.3.5	Landentwicklungsfachinformationssystem (LEFIS)	37
3.3.6	Land Parcel Identification System (LPIS)	37
3.3.7	Bestrebungen des Open Geospatial Consortium zur Verbesserung der Interoperabilität von Information in der Landwirtschaft	39
3.4	Zwischenfazit	40
4	Semantisches LandModell^{TUM}	43
4.1	Forschungsfragen	43
4.2	Grundlegende Modellierungskonzepte des LandModell ^{TUM}	44
4.2.1	Modularisierung	44
4.2.2	Geometrisch-semantische Kohärenz	44
4.2.3	Erweiterbarkeit	44
4.2.4	Konzept der semantischen Anreicherung	45
4.2.5	Kopplung des Modells mit komplexen Analysemethoden	45
4.3	Konzeptuelle Überlegungen zur Abbildung verschiedener Facetten der zeitlichen Veränderung	45
4.3.1	Modellierung der Objektlebensdauer	45
4.3.2	Modellierung objektübergreifender Übergangsbeziehungen	46
4.3.3	Konzept zur Versionierung von Objektzuständen	48
4.4	Zugrundeliegende Normen und Standards	50
4.5	Pakete des LandModell ^{TUM}	50
4.5.1	Modul Core	51
4.5.2	Modul AgriculturalLandUse	54
4.5.3	Modul Farming	56
4.5.4	Modul Vegetation	57
4.5.5	Modul SurfaceWater	58
4.5.6	Modul SettlementArea	58
4.5.7	Modul TrafficArea	59
4.5.8	Modul LandConsolidation	59
4.5.9	Modul StatisticalAggregationUnit	60
4.5.10	Modul Generics	61
4.5.11	Modul LandObjectGroup	61
4.5.12	Modul AgriculturalTransportation	62
4.5.13	Modul AgriculturalParcelShapeDescription	62
4.6	Diskussion des Informationsmodells	62
5	Implementierung des LandModell^{TUM} als Informationssystem	65
5.1	Genutzte Hard- und Software	65
5.1.1	Genutzte Hardware	65
5.1.2	Verwendete Software	66
5.2	Forschungsfragen	67

5.3	Regeln zur Abbildung des Informationsmodells auf das Datenbankschema	67
5.3.1	Abbildung von Paketen	68
5.3.2	Abbildung von Klassen, Vererbungen und einfachen Attributen	68
5.3.3	Abbildung komplexer Zeitreihenattribute	69
5.3.4	Abbildung von Assoziationen und Assoziationsklassen	71
5.4	Genutzte Datengrundlagen für den Aufbau des LandModell ^{TUM} - Informationssystems	73
5.4.1	Datengrundlagen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung	73
5.4.2	Datengrundlagen zu Verkehrswegen	74
5.4.3	Datengrundlage zu Amtlichen Hauskoordinaten	74
5.4.4	Datengrundlagen zu Flurstücken	75
5.4.5	Datengrundlagen zur Tatsächlichen Nutzung der Erdoberfläche	75
5.5	Diskussion des logischen Datenmodells	76
II	LandAnalyticsToolkit^{TUM}	77
6	Werkzeug zur Analyse raumzeitlicher Veränderungen der Kulturlandschaft	81
6.1	Verwandte Arbeiten	82
6.1.1	Flächenverbrauch und Landnutzungswandel	82
6.1.2	Veränderungen landwirtschaftlicher Betriebs- und Parzellenstrukturen	83
6.1.3	Zeitliche Abfolge von Kulturen auf landwirtschaftlichen Parzellen	85
6.2	Forschungsfragen	85
6.3	Konzeptionelle Überlegungen	86
6.3.1	Objektidentität und Regeln zur Objektbildung	87
6.3.2	Extraktion identischer Objekte aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben	88
6.3.3	Grundlegende Annahmen zur Objektlebensdauer und zur zeitlichen Gültigkeit von Objektzuständen	90
6.3.4	Ableitung der Objektlebensdauer und Erkennung der Zustandsverän- derungen von Geoobjekten	90
6.3.5	Klassifikation und Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwi- schen Objekten über die Zeit	91
6.4	Implementierung der Analysewerkzeuge zur Datenintegration	92
6.4.1	Grundlegender Aufbau der Werkzeuge zur Datenintegration	93
6.4.2	Prüfung der Eingangsdaten auf Validität, Bereinigung der Geometrie von Artefakten und Prüfung der Konsistenz	93
6.4.3	Detektion identischer Geoobjekte in aufeinanderfolgenden Schnapp- schüssen	103
6.4.4	Abgleich von Objektzuständen	104
6.4.5	Analyse, Klassifikation und Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit	105
6.5	Ergebnisse	106
6.5.1	Betrachtungen zur zeitlichen Stabilität der abgebildeten Objekte am Beispiel landwirtschaftlicher Parzellen	106
6.5.2	Rekonstruktion eines Zustands der Realwelt zu einem beliebigen Zeit- punkt der Vergangenheit	113
6.5.3	Analyse von Attributzeitreihen für Einzelobjekte	115
6.5.4	Übergangsbeziehungen zwischen Objekten der selben Art	117
6.5.5	Übergangsbeziehungen zwischen Objekten unterschiedlicher Art	119
6.5.6	Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz	124
6.6	Diskussion des entwickelten Ansatzes	125

7	Werkzeug zur parametrischen Beschreibung der Parzellengeometrie	129
7.1	Verwandte Arbeiten	130
7.1.1	Beschreibung der Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen	130
7.1.2	Ausgewählte Indikatoren zur Beschreibung der Form von Geoobjekten	130
7.2	Forschungsfragen	134
7.3	Konzeptuelle Überlegungen	135
7.3.1	Genutzte Methoden zur Beschreibung der Parzellengeometrie	135
7.3.2	Klassifikation und parametrische Beschreibung der Parzellenform . . .	138
7.3.3	Erforderliche Erweiterung des semantischen Datenmodells	140
7.4	Implementierung des Analysewerkzeugs	141
7.5	Ergebnisse	141
7.5.1	Betrachtungen zur Feldstücksgröße	141
7.5.2	Indikatorbasierte Beschreibung regionaler Parzellenstrukturen	143
7.5.3	Klassifikation der Form landwirtschaftlicher Parzellen	152
7.5.4	Parametrische Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen .	155
7.5.5	Regionalisierte Betrachtung von Feldstücksformen	156
7.6	Diskussion des entwickelten Ansatzes	158
8	Werkzeug zur Analyse von Hof-Feld-Transportpfaden	161
8.1	Stand des Wissens zu Hof-Feld-Transportentfernungen	163
8.2	Forschungsfragen	164
8.3	Konzeptionelle Überlegungen	164
8.3.1	Konzeptionelle Überlegungen zur Abschätzung von Hof-Feld-Pfaden .	164
8.3.2	Konzeptionelle Überlegungen zur Erweiterung des Informationsmodells	170
8.4	Implementierung des Analysewerkzeugs	171
8.4.1	Verwendete Datengrundlagen	171
8.4.2	Geokodierung der Betriebsstandorte	171
8.4.3	Abbildung von Präferenzen für einzelne Wegekategorien	174
8.4.4	Werkzeug zur Abschätzung landwirtschaftlicher Transportpfade	175
8.5	Ergebnisse	177
8.5.1	Anteil der Parzellen mit ermittelten Hof-Feld-Pfaden	177
8.5.2	Transportdistanz und Zusammensetzung für Einzelpfade	179
8.5.3	Landesweite Betrachtungen zu Hof-Feld-Transportentfernungen . . .	181
8.5.4	Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz	184
8.6	Evaluierung der Schätzqualität bei der Routenbestimmung	185
8.6.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Quantifizierung der Qualität der geschätzten Routen	185
8.6.2	Referenzdaten zur Validierung der Schätzqualität	186
8.6.3	Ergebnisse der Evaluierung	187
8.6.4	Schlussfolgerungen	189
8.7	Diskussion des entwickelten Ansatzes	189
9	Werkzeug zur Analyse der Verkehrsanbindung von Parzellen	193
9.1	Verwandte Arbeiten	194
9.2	Forschungsfragen	194
9.3	Konzeptionelle Überlegungen	195
9.3.1	Definition von überörtlichem und landwirtschaftlichem Wegenetz . . .	195
9.3.2	Konzeptionelle Überlegungen zur Analyse der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das übergeordnete Verkehrswegenetz	195
9.3.3	Ausgabe der Pfade und Abbildung der Ergebnisse	199
9.3.4	Erforderliche Erweiterungen des semantischen Datenmodells	200

9.4	Implementierung der Analysewerkzeuge	200
9.4.1	Verwendete Software	200
9.4.2	Datengrundlagen	200
9.4.3	Implementierung der Analysemethoden	200
9.5	Ergebnisse	216
9.5.1	Anteil der Parzellen mit Anschluss an das überörtliche Verkehrsnetz	217
9.5.2	Zusammensetzung von Einzelpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überörtlichen Straßennetz	217
9.5.3	Landesweite Betrachtung der Transportdistanzen zwischen Parzellen und dem überörtlichen Verkehrsnetz	218
9.5.4	Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz	219
9.6	Diskussion des entwickelten Ansatzes	220
10	Werkzeug zur Planungsunterstützung im Ländlichen Wegebau	223
10.1	Verwandte Arbeiten	225
10.2	Forschungsfragen	225
10.3	Konzeptionelle Überlegungen zur Ableitung der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente	226
10.4	Ableitung der Erschließungsfläche für Einzelsegmente	227
10.5	Evaluierung der Erschließungsfläche als Planungsgrundlage für die Konzeption von Kernwegesystemen	230
10.6	Diskussion des entwickelten Ansatzes	233
10.7	Ausblick	234
III	Schlussbetrachtungen und Ausblick	237
11	Zusammenfassung	239
12	Erkenntnisse und wissenschaftliche Beiträge zur Forschung	245
12.1	Wissenschaftliche Beiträge im Forschungsbereich der Geoinformatik	245
12.2	Wissenschaftliche Beiträge im Forschungsbereich der Landentwicklung	248
12.3	Wissenschaftliche Beiträge im Bereich der Agrarforschung	249
13	Ausblick und Forschungsbedarf	251
Anhang A	Veröffentlichungen, Vorträge und begleitende studentische Arbeiten	253
A.1	Wissenschaftliche Aufsätze im Kontext des LandModell ^{TUM}	253
A.2	Vorträge zum LandModell ^{TUM} im Rahmen wissenschaftlicher Veranstaltungen (Auswahl)	254
A.3	Studentische Arbeiten im Kontext des LandModell ^{TUM}	255
Anhang B	Raumzeitliche Veränderung der Kulturlandschaft	257
B.1	Fortführung und Neubildung landwirtschaftlicher Parzellen	258
B.2	Zusammenlegung landwirtschaftlicher Parzellen	261
B.3	Flächenbilanz der innerhalb des Datensatzes Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen	265
B.4	Objektartenübergreifende Übergänge	270
Anhang C	Parzellengrößen und -formen in Bayern	275
C.1	Feldstücksgrößen in Bayern	275
C.2	Formindikatoren zur Beschreibung der Feldstücksgeometrie	277

C.2.1	Indikator Konvexität	277
C.2.2	Indikator Rechteckigkeit	280
C.3	Formen landwirtschaftlicher Parzellen in Bayern	282
C.4	Regionale Verteilung verschiedener Formklassen	283
C.4.1	Rechteckige Feldstücke	283
C.4.2	Feldstücke mit einem hohen Grad der Rechteckigkeit	283
C.4.3	Dreieckige Feldstücke	284
C.4.4	Sonstige konvexe Feldstücke	284
C.4.5	Kreisförmige Feldstücke	285
C.4.6	Sonstige stark konkave Feldstücke	285
C.5	Parametrische Beschreibung der Form von Parzellen	286
C.5.1	Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Parzellen	286
C.5.2	Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Parzellen	287
Anhang D	Transportpfade in der Landwirtschaft	289
D.1	Hof-Feld-Transportentfernungen bei Ackerparzellen	289
D.2	Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandparzellen	291
Anhang E	Verkehrerschließung von Feldstücken	293
Anhang F	Eidesstattliche Erklärung	295
Literaturverzeichnis		296

Abbildungsverzeichnis

1:	Schematische Darstellung der Komplexität von Informationsflüssen zwischen verschiedenen Fachdisziplinen bei Verwendung heterogener Fachinformationsmodelle (links) und bei der Verwendung des LandModell ^{TUM} als gemeinsames, fachdisziplinenübergreifendes Referenzmodells (rechts)	2
2:	Administrative Gebiete (links) und Rasterzellen verschiedener Kantenlänge (rechts) als räumliche Einheiten zur statistischen Aggregation	15
3:	Schematische Darstellung des Schnappschuss-Ansatzes zur Historisierung von Geoobjekten; die in den einzelnen Zeitscheiben enthaltenen Objekte (A bis I) stehen in keiner Beziehung zu Objekten anderer Zeitscheiben und stellen daher jeweils eigenständige Objekte dar	20
4:	Schematische Darstellung der Abbildung von Objektlebensdauern; bei diesem Ansatz verfügen einzelne Geoobjekte neben der räumlichen auch über eine zeitliche Ausdehnung (in der Darstellung als gestrichelte Linien symbolisiert) .	21
5:	Hybrider Ansatz zur expliziten Abbildung von Objektlebensdauern (symbolisiert über raumzeitliche Volumenkörper) und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit (dargestellt als rote Übergänge) . . .	46
6:	Konzept zur Abbildung von objektübergreifenden Übergängen zwischen Objekten zum Zeitpunkt t_{n+1} ; Übergänge zwischen Objekten sind als rote, Schicksale einzelner Geometriefragmente als blaue Verbindungen symbolisiert	48
7:	Historisierung von Objektzuständen in Form einer Versionierung von Attributwertbelegungen; in der Darstellung ist die zeitliche Dimension nach rechts und die räumliche Dimension nach oben angetragen; Geoobjekte verfügen über eine räumliche wie auch über eine zeitliche Ausdehnung; Attribute eines Objekts besitzen eine zeitliche Ausdehnung	49
8:	UML-Paketdiagramm der im LandModell ^{TUM} abgebildeten Module	51
9:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Kernmoduls (Core)	52
10:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets AgriculturalLandUse . . .	55
11:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets Farming	57
12:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets Vegetation	57
13:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets SurfaceWater	58
14:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets SettlementArea	59
15:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets TrafficArea	59
16:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets LandConsolidation	60
17:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets StatisticalAggregationUnit	61

18:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets Generics	61
19:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets LandObjectGroup	62
20:	Schematische Darstellung der Kopplung von LandModell ^{TUM} und komplexen Analysemethoden des LandAnalyticsToolkit ^{TUM}	79
21:	Vom Schnappschüssen (links) zu Objektlebensdauer und objektübergreifenden Veränderungen über die Zeit (rechts)	88
22:	Prinzip der gegenüber für die Objektbildung irrelevanten Geometrieunterschieden toleranten Extraktion identischer Objekten aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben; r_{Toleranz} repräsentiert in der Abbildung einen geometrischen Toleranzbereich für zulässige geometrische Unterschiede zwischen als identisch zu klassifizierenden Geoobjekten	89
23:	Schematische Darstellung beobachteter Geometrieartefakte an Polygonen	95
24:	Gewähltes Vorgehen zur Detektion und Bereinigung von Artefakten in Form von Aussparungen innerhalb von Kreisringpolygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung	96
25:	Schematische Darstellung des gewählten Vorgehens zur Detektion und Bereinigung von Artefakten in Form von Polygonen bzw. Bestandteilen von Multipolygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung	96
26:	Zerschneidung der Polygoneometrie entlang von Schnittlinien nach dem Prinzip einer umlaufenden Schere	97
27:	Prinzip zur Bereinigung der Parzelleometrie von feinen Fortsätzen	98
28:	Prinzip zur Bereinigung der Geometrie von schmalen Stege zwischen äußeren und inneren Polygonumringen	98
29:	Prinzip zur Bereinigung der Geometrie von schmalen Verbindungsstege zwischen den Hauptkomponenten von Polygonen	98
30:	Bildung möglicher Polygone zur Füllung schmaler Einkerbungen in Polygonen bei Überkreuzung potentieller Schnittlinien mit dem Umring eines Polygons	99
31:	Bildung möglicher Polygone zur Füllung schmaler Einkerbungen in Polygonen bei fehlender Überkreuzung potentieller Schnittlinien mit dem Umring eines Polygons durch Snapping des Schnittlinienendpunktes auf Stützpunkte des Polygonumrings	100
32:	Prinzip der Bereinigung der Polygoneometrie von schmalen Einkerbungen	100
33:	Beispiel für die Verfüllung einer als Artefakt betrachteten Einkerbung eines Polygons; die Einkerbung besitzt eine maximale Breite von weniger als 4 cm und eine Länge von mehr als 150 m	101
34:	Beispiel für die Abspaltung von als Artefakt betrachteten Polygonfortsätzen; die Fortsätze besitzen eine maximale Breite von weniger als 15 cm und eine Länge von rund 90 m (links) bzw. eine maximale Breite von weniger als 25 cm und eine Länge von mehr als 80 m (rechts)	101
35:	Prinzip der Bereinigung von Überlappungen zwischen flächenhaften Geoobjekten der selben Art; die Geometrie der beteiligten Objekte wird gegeneinander verschnitten und die Splitterpolygone dem jeweils flächenmäßig kleinsten an der Überlappung beteiligten Objekt zugeordnet	102

36:	Darstellung der zeitlichen Stabilität von Feldstückobjekten; die Jahresangaben beziehen sich auf die ins Informationssystem integrierten Zeitscheiben	108
37:	Beobachtete zeitliche Gültigkeit von Objekten des Typs Feldstück nach verschiedenen Zeitintervallen	109
38:	Darstellung der zeitlichen Stabilität von Schlagobjekten; die Jahresangaben beziehen sich auf die ins Informationssystem integrierten Zeitscheiben	111
39:	Beobachtete zeitliche Gültigkeit von Objekten des Typs Schlag nach verschiedenen Zeitintervallen	112
40:	Zustand von Objekten vom Typ Schlag zum Zeitpunkt 01.06.2013 (Angaben zur Kulturart aus Gründen des Datenschutzes in der Visualisierung verändert) . . .	115
41:	Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen auf einem zufällig ausgewählten Schlag im Zeitraum von 2010 bis 2018; aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Abbildung lediglich die Jahre der jeweiligen Kultur angegeben.	117
42:	Beispielhafter Ausschnitt mit Zusammenlegung landwirtschaftlicher Parzellen (Objektart FarmerBlock) im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018	118
43:	Beispielhafter Ausschnitt mit Abspaltung landwirtschaftlicher Parzellen (Objektart FarmerBlock) im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018	118
44:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018; die Kernbandbreite beträgt 5 km; Regionen mit einer geringen räumlichen Dichte sind in der Darstellung blau, Regionen mit einer hohen räumlichen Dichte gelb dargestellt	119
45:	Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektklassen der Pakete Vegetation, SettlementArea, TrafficArea und SurfaceWater (Datenquelle TN) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 18.5.2018; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	121
46:	Flächengewichtete Heatmap objektartenübergreifender Übergangsbeziehungen von Objekten des Typs Agriculture (TN-Objektart AX_Landwirtschaft) zu Objektarten der Pakete SettlementArea und TrafficArea (TN-Objektartengruppen Siedlung und Verkehr) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018; die Gewichtung von Punkten erfolgt dabei über die Flächen der Geometriefragmente; die Kernbandbreite für die Visualisierung in der Heatmap beträgt 5km	122
47:	Geometrische Ausdehnung objektartenübergreifender Übergänge zwischen Elementen vom Typ Agriculture (TN-Objektart AX_Landwirtschaft) und Objekten der Pakete SettlementArea und TrafficArea (TN-Objektartengruppen Siedlung und Verkehr) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018	122
48:	Geometrische Ausdehnung objektartenübergreifender Übergänge zwischen landwirtschaftlichen Parzellen vom Typ FarmerBlock (Datenquelle: LPIS) und Objektarten der Pakete SettlementArea und TrafficArea (Datenquelle:TN-Objektartengruppen Siedlung bzw. Verkehr) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018	123
49:	Quantifizierung der Konvexität von Polygonen hinsichtlich der Fläche und hinsichtlich des Perimeters	136

50:	Geometrie, konvexe Hülle und flächenkleinstes umgebendes Rechteck eines beispielhaften Polygons	137
51:	Geometrie, konvexe Hülle und flächengrößtes innenliegendes Dreieck eines beispielhaften Polygons	138
52:	Entscheidungsbaum für die Klassifikation der Parzellenformen einschließlich der gesetzten Grenzwerte; P bezeichnet darin ein Polygon, KH meint konvexe Hülle eines Polygons	139
53:	UML-Klassendiagramm des LandModell ^{TUM} -Pakets AgriculturalParcelShape-Description	140
54:	Verteilungsfunktion der Feldstücksgrößen in Bayern (Stichtag: 01.06.2018) . .	142
55:	50 %-Quantil der Feldstücksgröße für das Jahr 2018 aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	142
56:	Summenhäufigkeitsfunktion der Feldstücksgröße in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandnutzung (Stichtag 01.06.2018)	143
57:	Indikatorwert Konvexität (Perimeter) für beispielhaft ausgewählte Parzellen . .	144
58:	Indikatorwert Konvexität (Fläche) für beispielhaft ausgewählte Parzellen	144
59:	Summenhäufigkeitsfunktion der Indikatoren Konvexität bezüglich der Fläche (links) und bezüglich des Perimeters (rechts) für die Feldstücke in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)	145
60:	50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke im Jahr 2018 aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	146
61:	Summenhäufigkeitsfunktion für den Indikator Konvexität (Fläche) differenziert nach Flächennutzung (Stichtag: 01.06.2018)	146
62:	Summenhäufigkeitsfunktion für den Indikator Konvexität (Perimeter) differenziert nach Flächennutzung (Stichtag: 01.06.2018)	147
63:	Indikatorwert Rechteckigkeit für beispielhaft ausgewählte Parzellen	148
64:	Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators Rechteckigkeit für Feldstückspolygone (Stichtag 01.06.2018)	149
65:	50 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	149
66:	Empirische Kumulative Häufigkeit der Rechteckigkeit von Feldstückspolygonen differenziert nach Acker und Grünlandnutzung (Stichtag: 01.06.2018)	150
67:	Indikatorwert IQ für beispielhaft ausgewählte Parzellen	151
68:	Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators IQ (Stichtag: 01.06.2018)	152
69:	Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators IQ differenziert nach Acker und Grünlandflächen (Stichtag: 01.06.2018)	152
70:	Ergebnis der Formklassifikation für beispielhaft ausgewählte Parzellen	153
71:	Feldstücksformen in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)	154

72:	Feldstücksformen in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandparzellen (Stichtag: 01.06.2018)	154
73:	Summenhäufigkeitsfunktion der Länge und der Breite rechteckiger Feldstücke mit Ackernutzung (Stichtag: 01.06.2018)	155
74:	Summenhäufigkeitsfunktion der Länge und der Breite rechteckiger Feldstücke mit Grünlandnutzung (Stichtag: 01.06.2018)	155
75:	Summenhäufigkeitsfunktion des LBV rechteckiger Feldstücke mit Acker- (links) bzw. Grünlandnutzung (rechts) (Stichtag: 01.06.2018)	156
76:	Relativer Anteil rechteckiger Feldstücke an der Gesamtanzahl der Parzellen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit	157
77:	50 %-Quantil Länge:Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit	157
78:	Massenanteile verschiedener Transportgüter in der deutschen Landwirtschaft (eigene Darstellung nach Bernhardt et al. 2005)	161
79:	Mögliche Ausgangspositionen (orange) eines Hof-Feld-Transportpfades im Umfeld landwirtschaftlicher Parzellen bzw. Hofstellen (blau) entlang von Segmenten des Verkehrsnetzes (grün)	166
80:	Prinzip der linearen Verortung eines Punktes A entlang der geometrischen Repräsentation der Kante e und anteilige Berechnung der Kosten zwischen dem Punkt A und dem Startpunkt S_e ($\text{Kosten}(A \rightarrow S_e)$) bzw. dem Endpunkt E_e ($\text{Kosten}(A \rightarrow E_e)$) bezogen auf die Gesamtkosten der Kante e ($\text{Kosten}(e)$) . . .	167
81:	Ermittlung möglicher Start- bzw. Zielknoten eines kostenminimalen Pfades zwischen einer Hofstelle und einer Parzelle	168
82:	Ableitung eines kostenminimalen Pfades zwischen einer Hofstelle A und einer Parzelle A_1 (Kantengewichte in Klammern angegeben); kleinteilige Abbildung der resultierenden Pfade über Referenzen auf die beteiligten Objekte	169
83:	UML-Klassendiagramm des Pakets AgriculturalTransportation	170
84:	Übersicht möglicher Kombinationen aus Straßename, Hausnummer und Hausnummerergänzungen in den Adressdaten des <i>Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem</i> (InVeKoS)	172
85:	Präferenzen, Gewichtungsfaktoren und angenommene Geschwindigkeiten für verschiedene Wegekategorien; Widmung, Wegekategorie sowie Informationen zu inner- bzw. außerörtlichem Verlauf der Wegsegmente entstammen den Angaben lt. <i>Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem</i> (ATKIS®) (Machl et al. 2018)	175
86:	Anteil der Ackerflächen mit ermitteltem Hof-Feld-Transportpfad aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	178
87:	Anteil der Grünlandflächen mit ermitteltem Hof-Feld-Transportpfad aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	178

88:	Hof-Feld-Transportpfad mit Pfadzusammensetzung für eine einzelne Fahrbeziehung (Stichtag: 01.06.2018)	181
89:	Summenhäufigkeitsfunktion der errechneten Hof-Feld-Transportentfernung in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)	181
90:	Summenhäufigkeitsfunktion der Hof-Feld-Transportentfernung für Acker- (links) und Grünlandflächen (rechts) in Bayern (Stichtag 01.06.2018)	182
91:	75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	183
92:	75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	183
93:	Ableitung des Indikators Grad der Übereinstimmung zwischen tatsächlichen und geschätzten Hof-Feld-Transportpfaden (Machl et al. 2018, verändert) . . .	185
94:	Position der zur Evaluierung von Hof-Feld-Transportpfaden herangezogenen landwirtschaftlichen Parzellen und Hofstellen	187
95:	Summenhäufigkeitsfunktion der geschätzten Fahrdistanzen für die zur Evaluierung von Hof-Feld-Transportrouten untersuchten Pfade (Machl et al. 2018) . .	187
96:	Streudiagramm geschätzter und beobachteter Transportdistanzen (links); Grad der Übereinstimmung zwischen beobachteten und geschätzten Transportpfaden (rechts) (Machl et al. 2018, Datengrundlage: Astner 2017)	188
97:	Beispiel zur Veranschaulichung der Problemstellung bei der Berechnung des kostenminimalen Pfades zwischen der Parzelle P und dem übergeordneten Verkehrsnetz	196
98:	Einteilung der Bestandteile des Wegenetzes in Kanten und Knoten des landwirtschaftlichen bzw. übergeordneten Verkehrsnetzes, Brücken sowie Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz . . .	198
99:	Relativer Anteil landwirtschaftlicher Parzellen (Feldstück) mit direkter bzw. indirekter Anbindung an das überörtliche Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag 01.06.2018)	217
100:	Geometrie und Zusammensetzung des kostenminimalen Pfades zwischen einem zufällig ausgewählten Feldstück und dem überörtlichen Verkehrsnetz (Stichtag: 01.06.2018)	218
101:	Summenhäufigkeitsfunktion der in Bayern beobachteten Pfadlänge zwischen landwirtschaftlichen Parzellen (Feldstück) und dem überörtlichen Verkehrsnetz (Stichtag: 01.06.2018)	219
102:	50 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem übergeordneten Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	219
103:	Längenanteile verschiedener Wegekategorien am bayerischen Verkehrsnetz für das Jahr 2019 (Berechnungsgrundlage: ATKIS [®] -Verkehrsnetz des Bayerisches Landesamt für Digitalisierung Breitband und Vermessung (LDBV)); die Klassifikation von Forstwegen erfolgt durch räumliche Verschneidung der Verkehrswegachsen mit Objekten der ATKIS [®] -Objektart AX_Wald . .	224

104:	Schematische Darstellung der Ableitung von Erschließungsflächen aus Einzelpfaden; im Beispiel werden die Parzellen A_1 und A_2 von Hofstelle A und die Parzelle B_1 angefahren; die Erschließungsfläche einzelner Segmente ergibt sich durch Aufsummieren der Fläche angebundener Parzellen (nach Machl et al. 2018, verändert)	226
105:	Ermittelte Erschließungsfläche und Fläche der angebotenen Kulturen für ein beispielhaft ausgewähltes Wegsegment (Stichtag: 01.06.2018)	229
106:	Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente des bayerischen Verkehrsweonetzes abgeleitet aus Hof-Feld-Transportpfaden (Stichtag: 01.06.2018)	229
107:	Beteiligte Kommunen der <i>Integriertes Ländliches Entwicklungskonzept</i> (ILEK)-Region NES-Allianz	230
108:	Visualisierung der aus Hof-Feld-Transportpfaden ermittelten Erschließungsfläche einzelner Segmente des ATKIS [®] -Verkehrswegenetzes (Stichtag: 01.06.2017)	231
109:	Visualisierung der aus Transportpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrsnetz ermittelten Erschließungsfläche einzelner Segmente des ATKIS [®] -Verkehrswegenetzes (Stichtag: 01.06.2017) . .	231
110:	Grundsätzliche Überlegungen zur Ausgestaltung der Smart Rural Area Data Infrastructure (SRADI) in Anlehnung an Moshrefzadeh et al. (2017)	252
111:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2010 bis 15.05.2011; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	261
112:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2011 bis 15.05.2012; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	261
113:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2012 bis 15.05.2013; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	262
114:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2013 bis 15.05.2014; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	262
115:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2014 bis 15.05.2015; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	263
116:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2015 bis 15.05.2016; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	263
117:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2016 bis 15.05.2017; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	264
118:	Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf	264

119:	Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2014 (Stichtag: 14.05.2014) bzw. 2015 (Stichtag: 06.05.2015); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	266
120:	Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2015 (Stichtag: 06.05.2015) bzw. 2016 (Stichtag: 17.05.2016); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	267
121:	Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2016 (Stichtag: 17.05.2016) bzw. 2017 (Stichtag: 26.05.2017); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	268
122:	Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2017 (Stichtag: 26.05.2017) bzw. 2018 (Stichtag: 23.05.2018); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	269
123:	Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 14.05.2014 und 06.05.2015; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	271
124:	Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 06.05.2015 und 17.05.2016; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	272
125:	Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 17.05.2016 und 26.05.2017; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1 000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	273
126:	Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 26.05.2017 und 23.05.2018; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1 000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet	274
127:	25 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	275
128:	50 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	276
129:	75 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	276
130:	25 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	277

131:	50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	277
132:	75 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	278
133:	25 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	278
134:	50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	279
135:	75 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	279
136:	25 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	280
137:	50 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	280
138:	75 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	281
139:	Feldstücksformen in Bayern (absolut; Stichtag: 01.06.2018)	282
140:	Feldstücksformen in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandnutzung (absolut; Stichtag: 01.06.2018)	282
141:	Relative Anteile rechteckiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung <i>konvexe</i> und <i>konkave Rechtecke</i>	283
142:	Relative Anteile von Feldstücken mit hohem Grad der Rechteckigkeit (Stichtag: 01.06.2018); als Feldstücke mit hohem Grad der Rechteckigkeit gelten in der Darstellung <i>konvexe</i> und <i>konkave Polygone hoher Rechteckigkeit</i>	283
143:	Relative Anteile dreieckiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018); Dreiecke gelten in der Darstellung <i>konvexe</i> und <i>konkave Dreiecke</i>	284
144:	Relative Anteile sonstiger, konvex geformter Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)	284
145:	Relative Anteile kreisförmiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)	285
146:	Relative Anteile stark konkaver Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)	285
147:	25 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	286
148:	50 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	286
149:	75 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	287
150:	25 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit	287

151:	50 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit	288
152:	75 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit	288
153:	25 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	289
154:	50 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	289
155:	75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	290
156:	25 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	291
157:	50 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	291
158:	75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	292
159:	25 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	293
160:	50 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	293
161:	75 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)	294

Tabellenverzeichnis

1:	Technische Daten der genutzten Hardware	65
2:	Relative Anteile der Fortführung und Neubildung von Feldstücken bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben	109
3:	Relative Anteile der Fortführung und Neubildung von Schlägen bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben	111
4:	Fortführung und Neubildung von Feldstücken bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben (Bayern gesamt)	259
5:	Fortführung und Neubildung von Schlägen bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben (Bayern gesamt)	260

Listingverzeichnis

1:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung des Schemas Core	68
2:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle Core.AbstractLandObject	68
3:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle AgriculturalLandUse.AbstractAgriculturalPlot als Kindtabelle der Tabelle Core.AbstractLandObject	69
4:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle AgriculturalLandUse.AgriculturalParcel als Kindtabelle der Tabelle AgriculturalLandUse.AbstractAgriculturalPlot	69
5:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle Core.AbstractTemporalAttribute	70
6:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Attributtabelle AgriculturalLandUse.agriculturalParcel_crop	70
7:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle AgriculturalLandUse.Management_AgriculturalParcel zur Abbildung von Assoziationsklassen	71
8:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle AgriculturalLandUse.TemporalEdge_AgriculturalParcel für die Abbildung der Übergangsbeziehungen zwischen Objekten des Typs AgriculturalParcel	72
9:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Datenbanksicht für die Rekonstruktion von Objekten des Typs Schlag zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit	113
10:	SQL-Ausdruck zur Selektion von Objekten vom Typ Schlag einschließlich des Objektzustands zum beispielhaften Stichtag 01.06.2013	114
11:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Datenbanksicht für die Rekonstruktion der Abfolge von Kulturen auf Objekten vom Typ Schlag	115
12:	SQL-Ausdruck zur Ableitung der Hof-Feld-Transportpfade aus den linearen Referenzen auf Segmente des Verkehrswegenetzes (vereinfacht)	180
13:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht Edge_SRN für die Abbildung von Kanten des übergeordneten Verkehrswegenetzes (vereinfacht)	201
14:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht Edge_ARN für die Abbildung von Kanten des landwirtschaftlichen Verkehrswegenetzes (vereinfacht)	202
15:	SQL-Ausdruck für die Erzeugung der Datenbanksicht ConnectionNode_ARN_SRN zur Abbildung von Knoten mit Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des überörtlichen Wegenetzes (vereinfacht)	203
16:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht StartNodeCostAssignment für die Abbildung von Ausgangsknoten für die Ermittlung der Pfadkosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz (vereinfacht)	205

17:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN für die Ermittlung von Startpositionen und für die Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen einer Startposition und einem physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (vereinfacht)	207
18:	SQL-Ausdruck zur Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordneten Verkehrsnetz und Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (vereinfacht)	213
19:	SQL-Ausdruck zur Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordneten Verkehrsnetz und landwirtschaftlichen Parzellen (vereinfacht)	215
20:	SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht ConnectedAreaRoadSegment für die Berechnung der Erschließungsfläche einzelner Straßensegmente (vereinfacht)	228

Abkürzungsverzeichnis

AAA [®]	AFIS [®] -ALKIS [®] -ATKIS [®]
ABAG	Allgemeine Bodenabtragsleichung
ADE	Application Domain Extension
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AFIS [®]	Amtliches Festpunktinformationssystem
ALKIS [®]	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
ALRSH	Akademie für die Ländlichen Räume SchleswigHolstein
ArgeLandentwicklung	Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung
ARN	Agricultural Road Network
ATKIS [®]	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Basis-DLM	Basis-Digitales Landschaftsmodell
BayStMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten
BayStrWG	Bayerisches Straßen- und Wegegesetz
b_{\min} Aussparung	Mindestbreite einer Aussparung innerhalb eines Polygons
b_{\min} Polygon	Mindestbreite des Bestandteils eines Multipolygons [m]
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CityGML	City Geography Markup Language
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CSL	conceptual schema language
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DFK	Digitale Flurkarte
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.
DWG	Domain Working Group
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EN	Europäische Norm
EPLR	Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum
ER-Modell	Entity-Relationship-Modell
ETL	Extract-Transform-Load
EU	Europäische Union
FEM	Feature Evolution Model
Fläche(KH(P))	Fläche der konvexen Hülle eines Polygons P
Fläche(KUR(P))	Fläche der kleinsten umgebenden Rechtecks eines Polygons P
FlurbG	Flurbereinigungsgesetz
FME	Feature Manipulation Engine
Fläche(P)	Flächeninhalt des Polygons P

GAP	Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union
GDI	Geodateninfrastruktur
GDÜ	Grad der Übereinstimmung
GFM	General Feature Model
GI	Geoinformatik
GIS	Geoinformationssystem
GML	Geography Markup Language
IBA	Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur
IEC	International Electrotechnical Commission
ILEK	Integriertes Ländliches Entwicklungskonzept
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
InVeKoSV	InVeKoSverordnung
IoT	Internet of Things
IQ	Isoperimetrischer Quotient
ISO	International Organization for Standardization
JRC	Joint Research Centre der Europäischen Kommission
KH(P)	konvexe Hülle eines Polygons P
Konvexität _{Fläche} (P)	Konvexität eines Polygons P nach der Fläche
Konvexität _{Perimeter} (P)	Konvexität eines Polygons P nach dem Perimeter
KUR(P)	Kleinstes umgebendes Rechteck eines Polygons P
LADM	Land Administration Domain Model
LBV	Länge : Breite Verhältnis
LCM	LPIS Core Conceptual Model
LDBV	Bayerisches Landesamt für Digitalisierung Breitband und Vermessung
LEFIS	Landentwicklungsfachinformationssystem
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Länge _{geschätzterPfad}	Gesamtlänge eines geschätzten Pfades
LOD	Level of Detail
LPIS	Land Parcel Identification System
l _{Schnittlinie}	Länge einer Schnittlinie zur Abtrennung von Artefakten aus Polygonen [m]
Länge _{Übereinstimmung}	Länge übereinstimmender Pfadb Bestandteile
LwAnpG	Landwirtschaftsanpassungsgesetz
MW	arithmetischer Mittelwert
NAS	Normbasierte Austauschschnittstelle
NBA	Nutzerbezogene Bestandsdatenaktualisierung
NES	Bad Neustadt an der Saale
OCL	Object Constraint Language
OGC [®]	Open Geospatial Consortium
OMG [®]	Object Management Group
OWL	Web Ontology Language
q ₂₅	25 %-Quantil
q ₅₀	50 %-Quantil
q ₇₅	75 %-Quantil
RDF	Resource Description Framework
r _{Hofstelle}	Suchradius für Ausgangspositionen eines kostenminimalen Pfades im Umfeld einer Hofstelle [m]
RLW	Richtlinie Ländlicher Wegebau

r_{Parzelle}	Suchradius für Ausgangspositionen eines kostenminimalen Pfades im Umfeld einer Parzelle [m]
r_{snapping}	Toleranzbereich für Auffüllen von Artefakten in Form schmaler Einkerbungen in den Polygoninnenraum [m]
r_{Toleranz}	Toleranzbereich der zulässigen geometrischen Abweichung zwischen als identisch zu klassifizierenden Geoobjekten [m]
SDDI	Smart Districts Data Infrastructure
SOS	Sensor Observation Service
SQL	Structured Query Language
SRADI	Smart Rural Area Data Infrastructure
SRN	Supraregional Road Network
TC	Technical Committee
TK	Topographische Karte
TN	Tatsächliche Nutzung
TS	Technical Specification
UML	Unified Modeling Language
W3C	World Wide Web Consortium
WFS	Web Feature Service
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

Kulturlandschaften entsprechen einem komplexen, mehrskaligen und vielfältigen Mosaik interagierender und multifunktionaler Komponenten, welche jeweils einer stetigen Weiterentwicklung und dynamischen Umgestaltung unterliegen. Die einzelnen Komponenten bzw. Kulturlandschaften als Ganzes erbringen dabei eine Reihe von Ökosystemleistungen und übernehmen vielfältige ökologische, ökonomische oder aber auch soziale Funktionen. Beispielsweise dienen sie als Standort land- und forstwirtschaftlicher Produktion, als Lebensraum für verschiedenste Organismen, als Siedlungsraum für Menschen, als Ort industrieller Produktion oder als Raum für Mobilität, Erholung, Freizeit und Tourismus. Ähnlich vielfältig und komplex wie das System Kulturlandschaft selbst ist auch die Vielfalt der Akteure, welche jeweils verschiedene Aspekte der Kulturlandschaft aus unterschiedlichen Perspektiven sowie auf unterschiedlichen Skalenebenen betrachten und teils auch aktiv umgestalten. In den einzelnen Fachbereichen der Agrar- und Agrarlandschaftsforschung, der Bodenordnung und Landentwicklung, des Umweltmonitorings und der Umweltplanung, dem Forstmanagement sowie auch in den weiteren Bereichen der Landnutzung dienen zumeist sektorale und vielfach ausschließlich auf bestimmte Anwendungen bezogene Fachinformationsmodelle und -systeme zur Abbildung von Informationen und Prozessen im Kontext der Kulturlandschaft. Als ursächlich für die auftretende Heterogenität zwischen den Informationsmodellen und -systemen sei neben der unterschiedlichen thematischen Ausrichtung und der zwischen den Fachdisziplinen nicht selten ungleichen, räumlich-semantischen Abgrenzung von Objekten insbesondere auch die Inhomogenität der jeweils betrachteten Skalenebenen angeführt. Die Heterogenität der Informationsmodelle erschwert einerseits vielfach den Informationsaustausch und damit auch die Kooperation zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen sowie andererseits auch eine umfassende und integrierte Betrachtung des komplexen Systems Kulturlandschaft. Abbildung 1 (links) verdeutlicht schematisch die Komplexität des Informationsflusses zwischen unterschiedlichen Akteuren und Stakeholdern innerhalb der Kulturlandschaft.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel des in dieser Arbeit beschriebenen LandModell^{TUM} in einer raumzeitlichen Abbildung der Kulturlandschaft in einem skalenübergreifenden, zunächst anwendungsneutralen und erweiterbaren Informationsmodell. Das Informationsmodell bzw. die darin abgebildeten Elemente verstehen sich grundsätzlich als Plattform zur Verknüpfung interdisziplinärer Information über den gemeinsamen Bezug auf ein einheitliches semantisches Modell bzw. identische Objekte (Abbildung 1 rechts). Aufgrund der klaren semantischen Definition von Objekten, Attributen und Beziehungen zwischen Objekten sowie aufgrund der Konformität zu internationalen Normen bietet das Informationsmodell eine formal beschriebene Grundlage für die Entwicklung komplexer Werkzeuge zur Analyse verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft. Wenngleich das LandModell^{TUM} unterschiedliche thematische Facetten der Kulturlandschaft behandelt, liegt im aktuellen Ausbauzustand ein Schwerpunkt des Informationsmodells insbesondere auf einer semantisch differenzierten Abbildung des Komplexes *Landwirtschaft*, welche insbesondere für Mitteleuropa prägend für Kulturlandschaften ist (stellvertretend: Haber 1996).

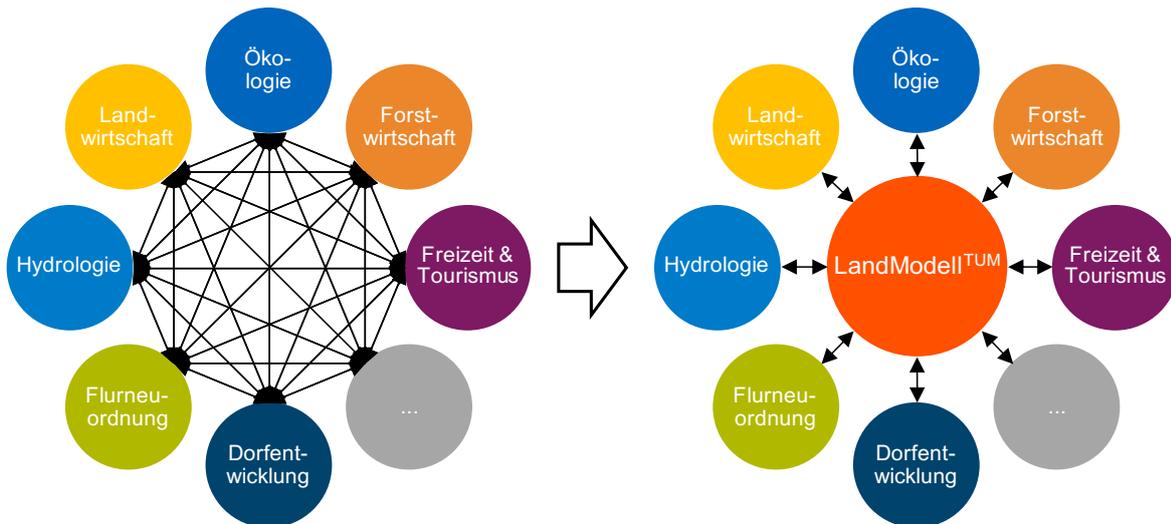


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Komplexität von Informationsflüssen zwischen verschiedenen Fachdisziplinen bei Verwendung heterogener Fachinformati-onsmodelle (links) und bei der Verwendung des LandModell^{TUM} als gemeinsames, fachdisziplinenübergreifendes Referenzmodells (rechts)

Strukturelle Entwicklungen in der Landwirtschaft, aber beispielsweise auch veränderte politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen führen in jüngerer Vergangenheit zu sichtbaren Veränderungen in der Agrarlandschaft. So lässt sich beispielsweise insbesondere im früheren Bundesgebiet eine Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe bei gleichzeitiger Zunahme der bewirtschafteten Fläche der verbleibenden Betriebe beobachten (BMEL 2020, S. 23 Tabelle 13). Mit zunehmender Rationalisierung der Landbewirtschaftung gewinnt der Einsatz leistungsfähiger und schlagkräftiger Landtechnik, sowie auch der überbetriebliche Maschineneinsatz an Bedeutung. Die effiziente Auslastung dieser Maschinen wiederum stellt veränderte Ansprüche an die Struktur der Parzellen, weshalb deren Größe, deren Form sowie auch deren Verkehrsanbindung verstärkt in den Fokus rücken (stellvertretend: Brunotte und Fröba 2007). Wurde die Umgestaltung der Parzellenstrukturen in der Vergangenheit von Flurbereinigung bzw. Flurneueordnung vorangetrieben und begleitet, so finden Veränderungen heute nicht selten pachtbasiert statt, weshalb entsprechende Veränderungen der bestehenden Parzellenstrukturen nicht unmittelbar analysier- und beispielsweise durch Verfahren der Landentwicklung begleitbar sind. Aufgrund der zumeist pachtbasierten Ausweitung der Betriebsflächen liegen Parzellen nicht selten verstreut und in größerer Entfernung zu den Hofstellen (stellvertretend: Süß 2014). Folglich gewinnen überregionale Transporte in der Landwirtschaft zunehmend an Bedeutung.

Ebenfalls verbunden mit der Rationalisierung in der Landwirtschaft ist vielfach auch eine Spezialisierung von Betrieben, wodurch es einerseits zu einer Trennung zwischen Pflanzen-, Tier- und neuerdings auch Energieproduktion sowie andererseits auch einer Spezialisierung innerhalb der jeweiligen Produktionsrichtung kommt (Haber 2014, S. 86). Damit verbunden lässt sich vielerorts eine Einengung des regionalen Kulturartenspektrums und verbreitet auch eine Intensivierung von Fruchtfolgen beobachten (Haber 2014; Ringler und Frobel 2013), was sich u.U. auf Bodenfruchtbarkeit, Gewässer oder Biodiversität auswirken kann.

In jüngster Vergangenheit rückt speziell die Rolle der Kulturlandschaft als Lebensraum für Vögel, Wildtiere und Insekten wieder verstärkt in den Fokus der gesellschaftlichen und politischen Diskussionen (stellvertretend: Haber 2016; Kollmann 2019). Infolgedessen werden aktuell verschiedene Maßnahmen zur Förderung der Agrobiodiversität in der Kulturland-

schaft entwickelt und umgesetzt. Hierunter fällt beispielsweise die Anlage von Blühflächen, verschiedenste Extensivierungsmaßnahmen, die Ausweitung des ökologischen Landbaus sowie auch die Etablierung von Gewässerrandstreifen, welche einerseits dem Schutz von Gewässern dienen und andererseits auch zur Förderung der Agrobiodiversität bzw. zur Schaffung und Vernetzung von Lebensräumen beitragen können. Zunehmend gewinnt insbesondere auch die topologische Vernetzung verinselter Lebensräume und Biotope mehr und mehr an Bedeutung, was aller Voraussicht nach wiederum eine grundlegende Umgestaltung von Landschaften zur Folge haben könnte.

Die Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzfläche für die Ausweitung von Siedlungs-, Verkehrs-, Industrie- oder Gewerbeflächen sowie auch die Entwicklung von Konzepten zur Reduktion des Flächenverbrauchs rückt zunehmend in den Fokus der gesellschaftlichen Diskussion (stellvertretend: DLKG 2016, 2017). Mit der Ausweitung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe tritt mancherorts die Erzeugung von Energiepflanzen in Flächenkonkurrenz zum Anbau von Nahrungs- oder Futterpflanzen (stellvertretend: FNR 2015; Hendricks 2017). Zudem entstehen im Kontext der Energiewende mit dem Bau von Freiflächenphotovoltaik- oder Windkraftanlagen sowie mit dem Bau von Stromtrassen neue Formen der Flächenbeanspruchung bzw. der Umstrukturierung von Landschaften.

Zur Erprobung der entwickelten Konzepte sowie insbesondere auch zur Demonstration der Einsetzbarkeit des LandModell^{TUM} für die Bearbeitung interdisziplinärer Fragestellungen werden im Rahmen dieser Arbeit fünf Werkzeuge zur landesweiten Analyse unterschiedlicher Aspekte der Kulturlandschaft realisiert. Diese Methoden und Werkzeuge bewegen sich inhaltlich im Bereich der zuvor angesprochenen Themenfelder und beschäftigen sich mit:

- Analyse von Veränderungen einzelner Elemente der Kulturlandschaft über die Zeit
- Monitoring bestehender Parzellenformen und -strukturen
- Analyse von Hof-Feld-Transportrouten in der Landwirtschaft
- Analyse der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das Verkehrswegenetz
- Bereitstellung objektiver Planungsgrundlagen für den bedarfsgerechten Aus- und Aufbau ländlicher Kernwegesysteme für die Landwirtschaft

Dabei besteht der Anspruch jeweils grundsätzlich in einer landesweit flächendeckenden und gleichzeitig einzelobjektbezogenen Betrachtung der genannten Aspekte. Das Datenmodell bzw. die darin abgebildeten Elemente bilden einerseits die Grundlage der Analysen und dienen andererseits als Plattform zur Fusion der interdisziplinären Fachinformation.

1.1 Begriff Kulturlandschaft im Kontext des LandModell^{TUM}

In der vorliegenden Arbeit ist mit dem Begriff Kulturlandschaft „die vom Menschen gestaltete und bewirtschaftete Landschaft im Gegensatz zur Naturlandschaft als [...] weitestgehend unberührten Landschaft“ gemeint, „wozu auch die Städte als urbane Landschaften gehören“ (Thiemann 2017). Haber (2014, S. 20) unterscheidet dabei grundlegend vier Kategorien von Bestandteilen der Kulturlandschaft, welche bereits seit dem Ende des Neolithikums bestehen und in der dargestellten Reihenfolge einer zunehmenden Beeinflussung durch den Menschen unterliegen:

1. „unberührt erscheinende, ursprüngliche Natur, die nicht oder nur gelegentlich durch Jagen und Sammeln genutzt wurde und naturnah blieb;
2. ursprüngliche Natur, die regelmäßig durch Sammeln, Materialentnahmen aller Art und Jagen, vor allem aber als Viehweide oder -futterquelle genutzt, jedoch nur wenig oder nur oberflächlich gepflegt [...] wurde und allmählich in einen halbnatürlichen Charakter [...] übergang;
3. vom Menschen für den Anbau von Nutzpflanzen - durch Beseitigung der natürlichen Pflanzendecke - geschaffenes Kulturland, von dem wieder eindringende Wildpflanzen und -tiere möglichst ferngehalten wurden;
4. mit festen Gebäuden bestandenes Wohn- und Siedlungsland einschließlich Höfen, Gärten sowie Transport- und Verkehrswegen“

Der inhaltliche Fokus dieser Arbeit liegt insbesondere auf einer differenzierten Abbildung des landwirtschaftlich geprägten Teils des Offenlandes, wengleich auch die Aspekte Siedlung, Verkehr, Gewässer und übrige Vegetation im semantischen Datenmodell bzw. im Informationssystem adressiert werden.

1.2 Zentrale Forschungsfragen dieser Arbeit

Der Aufbau des in dieser Arbeit beschriebenen Informations- bzw. Monitoringsystems zur Analyse der Kulturlandschaft und ihrer zeitlichen Entwicklung ist mit einer Reihe zu bearbeitender Forschungsfragen verbunden. Diese beziehen sich auf die Ausgestaltung des Informationsmodells, die Implementierung des semantischen Modells in einem Informationssystem sowie auf die Konzeption und Umsetzung komplexer Analysewerkzeuge. Als übergeordnete Forschungsfragen dieser Arbeit sind anzuführen:

1. Welche Konzepte sind erforderlich, um das Informationsmodell bzw. ein daraus abgeleitetes Informationssystem als Digitalen Zwilling der Kulturlandschaft für die Bearbeitung inter- und transdisziplinärer Fragestellungen einsetzen zu können?
2. Wie ist ein zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell der Kulturlandschaft auszugestalten, um es als Plattform zur Fusion von Information verschiedener Fachdisziplinen nutzen zu können?
3. Wie lassen sich die verschiedenen Facetten der zeitlichen Fortentwicklung einzelner Komponenten der Kulturlandschaft umfassend, explizit und semantisch differenziert im Informationsmodell abbilden?
4. Inwiefern ist es möglich, auf Grundlage landesweit verfügbarer Geodatenbestände Untersuchungen mit hoher Aussagekraft für Einzelobjekte durchführen zu können?
5. Wie sind Werkzeuge zur flächendeckenden Analyse verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft zu konzipieren, um sowohl ein Höchstmaß an Detailschärfe für Einzelobjekte und als auch eine hohe Performanz zu gewährleisten?

Neben diesen übergeordneten Forschungsfragen finden sich in den einzelnen Kapiteln jeweils zusätzliche Forschungsfragen, welche einerseits die genannten Fragestellungen konkretisieren oder andererseits thematische Teilaspekte der einzelnen Abschnitte betreffen.

1.3 Aufbau und Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit untergliedert sich in drei Teile. Der **erste Teil** der Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Ausgestaltung des Informationsmodells und dessen Implementierung in einem landesweiten Informationssystem. Hierzu werden zunächst verschiedene Anwendungsbereiche des LandModell^{TUM} exemplarisch beschrieben und deren Anforderungen an die Ausgestaltung des Informationsmodells benannt. Es folgt eine Darlegung des Wissensstands zu bestehenden Informationsmodellen der Kulturlandschaft und zu Konzepten für die Abbildung zeitlicher Aspekte in räumlichen Informationsmodellen und -systemen. Nach einer Beschreibung der grundsätzlichen Überlegungen zur Ausgestaltung des Informationsmodells - insbesondere zur umfassenden Abbildung der zeitlichen Entwicklung der Kulturlandschaft - findet sich eine Beschreibung des in dieser Arbeit entwickelten semantischen Datenmodells. Die anschließenden Kapitel beschreiben die Vorgehensweise zur Abbildung des semantischen Datenmodells in einem landesweiten, raumzeitlichen Datenbanksystem sowie auch die zum Aufbau des Informationssystems herangezogenen Datensätze und -quellen. Das semantische Datenmodell wie auch dessen Implementierung in einem landesweiten Informationssystem werden jeweils diskutiert.

Im **zweiten Teil** der Arbeit findet sich eine Darstellung der auf Grundlage des semantischen Datenmodells bzw. dessen Implementierung realisierten Analysewerkzeuge zur Untersuchung verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft. Die derzeit fünf Werkzeuge dieses *LandAnalyticsToolkit*^{TUM} setzen unmittelbar auf dem LandModell^{TUM} auf und beleuchten verschiedene Fragestellungen unterschiedlicher Fachdisziplinen:

1. Das *erste Werkzeug* dient der Integration der aus heterogenen und verteilten Datenquellen stammenden Datensätze in das Datenbanksystem des LandModell^{TUM}. Mit Hilfe des Werkzeugs lassen sich rückwirkend Objektlebensdauern, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen aus Abfolgen von Schnappschüssen verschiedener Datenbestände extrahieren, analysieren und im Informationssystem dokumentieren. Neben der Transformation der Daten in die Struktur des LandModell^{TUM} beinhaltet das Werkzeug zudem eine umfassende Validitäts- und Konsistenzprüfung der Eingangsdaten.
2. Mit Hilfe des *zweiten Werkzeugs* lassen sich landwirtschaftliche Parzellen hinsichtlich ihrer Form beschreiben, klassifizieren und anhand formtypischer Parameter charakterisieren. Die Ergebnisse des Werkzeugs ermöglichen eine flächendeckende Beschreibung regionaler Parzellenformen und -strukturen.
3. Das *dritte Werkzeug* beschäftigt sich mit der Analyse von Transportbeziehungen in der Landwirtschaft und ermöglicht ein landesweites Monitoring bestehender Transportpfade und -distanzen.
4. Der Zweck des *vierten Werkzeugs* ist die landesweite Evaluierung der Anbindungsqualität landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrswegesystem. Neben dem landesweiten Monitoring von Transportdistanzen zwischen Parzellen und dem überörtlichen Wegenetz ist es damit möglich auch detaillierte Aussagen zur Qualität der Anbindung zu treffen.
5. Im Kontext der Konzeption von Kernwegesystemen beschäftigt sich das *fünfte Werkzeug* mit der Ableitung objektiver Planungsgrundlagen zur Beurteilung der Relevanz einzelner Bestandteile des Wegesystems für den Fluss des landwirtschaftlichen Verkehrs. Neben einem Monitoring bestehender Gegebenheiten besteht das Ziel des Werkzeugs auch in einer objektiven Bewertung von Planungsalternativen.

Jedes der realisierten Werkzeuge wird in je einem Kapitel beschrieben. In jedem der Kapitel werden zunächst grundlegende Hintergründe erläutert, Forschungsfragen aufgeworfen, konzeptuelle Überlegungen zur Lösung dieser Fragestellung dargelegt, die Implementierung der Methoden beschrieben und Ergebnisse der mit Hilfe der Werkzeuge durchgeführten Analysen präsentiert. Darüber hinaus enthält jedes Kapitel eine ausführliche Diskussion der entwickelten Lösungsansätze sowie der erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse.

Der **dritte Teil** fasst die grundlegenden Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und diskutiert die erzielten Ergebnisse vor dem Hintergrund der in Abschnitt 1.2 aufgeworfenen Forschungsfragen des LandModell^{TUM}. Weiterhin werden die Beiträge der vorliegenden Arbeit für die Forschung in den Bereichen Geoinformatik, Landentwicklung und Landwirtschaft herausgestellt. Die Arbeit endet mit einem Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des LandModell^{TUM}.

Teil I

LandModell^{TUM} - ein raumzeitliches Modell der Kulturlandschaft

2 Anwendungsbereiche des LandModell^{TUM} und resultierende Anforderungen

Dieser Abschnitt skizziert Anwendungsbereiche des LandModell^{TUM} und leitet daraus Anforderungen ab, welche für die Ausgestaltung des Modells zu berücksichtigen sind. Zu den potentiellen Anwendungsbereichen zählen unter anderem: 1. das Monitoring von Veränderungen der Agrarlandschaft, 2. die parametrische Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen, 3. eine Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen, 4. verschiedene Anwendungen im Bereich der Flurneuordnung und des ländlichen Wegebbaus sowie 5. auch Analysen zu verschiedenen agrarökologischen Fragestellungen. Die folgenden Abschnitte beleuchten die aufgeführten Anwendungsfelder des LandModell^{TUM} und stellen die daraus resultierenden Anforderungen an die Ausgestaltung des Monitoringsystems heraus.

2.1 Monitoring von Veränderungen der Kulturlandschaft

Die Kulturlandschaft entspricht einem komplexen Geflecht interagierender und sich verändernder Elemente und Subsysteme. Dabei unterliegen einzelne Komponenten wie auch Beziehungen zwischen einzelnen Elementen einer stetigen zeitlichen Veränderung. Beispielfür die große Vielzahl möglicher Arten zeitlicher Veränderungen im Bereich der Landwirtschaft sei an dieser Stelle die geometrische Umformung von Parzellen, die Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen auf einer Parzelle sowie die über die Zeit veränderliche Bewirtschaftungsbeziehung zwischen einer Parzelle und einem landwirtschaftlichen Betrieb angeführt. Dabei gilt es, neben den Zustandsveränderungen von Objekten über die Zeit auch objektartenübergreifende Veränderungen beispielsweise bei der Überführung landwirtschaftlicher Parzellen in andere Formen der Landnutzung zu erfassen und – um bei diesem Beispiel zu bleiben – Senken des Verbleibs landwirtschaftlicher Parzellen zu identifizieren.

Das Informationsmodell als Kern des raumzeitlichen Monitoringsystems sollte vor diesem Hintergrund in der Lage sein, sowohl historische Zustände bzw. Konstellationen einzelner Objekte zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit rekonstruieren zu können als auch objekt- bzw. objektartenübergreifende Veränderungen explizit zu erfassen. Die Abbildung von objektübergreifenden Veränderungen über die Zeit sollte eine kleinteilige, räumlich-semantic detailierte Beschreibung der Übergangsbeziehungen beinhalten. Zur Analyse objektartenübergreifender Veränderungen sind neben Objektarten mit Bezug zum Themenkomplex Landwirtschaft auch Objektarten der Themenfelder Verkehr, Vegetation, Siedlung und Gewässer im Modell zu berücksichtigen.

Ziel der Modellierung sollte es sein, die Lebensdauer von Objekten über möglichst lange Zeiträume aufrecht zu erhalten. Dies ist einerseits wichtig für die Betrachtung von Zeitreihen verschiedener Phänomene sowie andererseits für eine längerfristige Nutzung der einzelnen Elemente als Bezugsobjekte zur semantischen Anreicherung um interdisziplinäre Information. Für Geoobjekte bedeutet dies unter Umständen eine Auflösung bzw. Aufweichung der

engen Verknüpfung zwischen Objekt und Objektgeometrie, wie sie in bestehenden Geoinformationssystemen derzeit üblich ist.

2.2 Landesweites Monitoring regionaler Parzellenstrukturen in der Landwirtschaft

Regional zeigen sich in der Landwirtschaft aufgrund unterschiedlicher räumlicher Gegebenheiten (z.B. Relief und Topografie), historischer Entwicklungen (z.B. Realteilung) oder infolge einer Umgestaltung (z.B. Flurneuordnung) teils erhebliche regionale Unterschiede hinsichtlich der bestehenden Flächenstrukturen. Regionale Strukturunterschiede betreffen sowohl die Größe als insbesondere auch die Form landwirtschaftlicher Parzellen. Beide Eigenschaften beeinflussen unmittelbar den mit der Bewirtschaftung einer Parzelle verbundenen Zeit- und Kostenaufwand. Gleichzeitig stehen regionale Parzellenstrukturen gemeinsam mit anderen topographischen Gegebenheiten in direktem Zusammenhang mit der potentiellen Diversität des Nutzungsmosaiks einer Landschaft, der Vielfalt aneinandergrenzender Lebensräume und dem Anteil nicht bzw. nur extensiv bewirtschafteter Rand- bzw. Übergangsbereiche, welche potentiell als Lebensraum für Wildtiere dienen können.

Bisherige Untersuchungen zu regionalen Strukturunterschieden beschränken sich hauptsächlich auf die statistische Beschreibung der Parzellengrößen innerhalb definierter räumlicher Einheiten. Für eine umfassende Analyse regionaler Parzellenstrukturen sind Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe sich die Form einzelner Parzellen untersuchen, klassifizieren und anhand formtypischer Parametern beschreiben lässt. Sämtliche im Rahmen der Analysen gewonnenen Informationen sind dabei auf Ebene einzelner Objekte vorzuhalten. Daher ist es erforderlich Konzepte zur semantischen Anreicherung von Objekten bereits bei der Konzeption des Informationsmodells zu berücksichtigen.

Für das Monitoring regionaler Strukturveränderungen ist zudem eine umfassende Abbildung der Dimension Zeit erforderlich (vgl. Abschnitt 2.1). Parzellenumformungen lassen sich somit auch hinsichtlich des Effekts einer Veränderung auf die Form von Parzellen beurteilen.

2.3 Analyse landwirtschaftlicher Transportpfade

Veränderte Rahmenbedingungen haben in den vergangenen Jahren zu einer nicht unerheblichen Intensivierung des Transportgeschehens in der Landwirtschaft beigetragen. Als treibende Kräfte hierfür seien neben dem insbesondere im früheren Bundesgebiet nach wie vor zu beobachtenden Strukturwandel und der zunehmend überbetrieblichen Bewirtschaftung von Parzellen auch veränderte Güter- und Massenströme beispielsweise aufgrund der Ausweitung des Anbaus von Energiepflanzen angeführt. Mit dem Betriebsgrößenwachstum steigt zumeist auch die Anzahl der bewirtschafteten Parzellen (= Anzahl der Transportbeziehungen) je Betrieb und damit auch die zu verrichtende Transportarbeit. Nicht selten liegen zusätzliche Parzellen verstreut und in größerer Distanz von den Hofstellen entfernt. Vielfach ist von steigenden Transportdistanzen und von einer zunehmenden Bedeutung überregionaler Transportbeziehungen die Rede.

Für das Monitoring von Transportpfaden in der Landwirtschaft sind daher Konzepte und Methoden für ein flächendeckendes und gleichzeitig detailliertes Monitoring von Hof-Feld-

Transportpfaden zu realisieren. Bei der Ausgestaltung des LandModell^{TUM} sind daher einerseits Konzepte für eine Abbildung topologischer Netzwerke sowie andererseits auch Ansätze zur kleinteiligen Abbildung von Transportpfaden als Ergebnis der durchgeführten Analysen zu entwickeln.

2.4 Flurneuordnung und ländlicher Wegebau

Grundlegendes Ziel von Flurneuordnungsverfahren im Sinne des *Flurbereinigungsgesetzes* (FlurbG) ist insbesondere die „Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft“ sowie auch eine „Förderung der allgemeinen Landeskultur und der Landentwicklung“ (§ 1 FlurbG). Entsprechend ist „zersplitterter oder unwirtschaftlich geformter Grundbesitz nach neuzeitlichen betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zusammenzulegen und nach Lage, Form und Größe zweckmäßig zu gestalten“ (§ 37 FlurbG). Mit den Instrumenten der Flurbereinigung sollen insgesamt „die Grundlagen der Wirtschaftsbetriebe verbessert, der Arbeitsaufwand vermindert und die Bewirtschaftung erleichtert werden“ (§ 37 FlurbG). Hierzu zählt unter anderem auch die Anlage von Wegen und Straßen, welche zur Erschließung von Parzellen dienen.

Die Durchführung von Flurneuordnungsverfahren erfordert eine umfassende Betrachtung des jeweiligen Landschaftsausschnitts bzw. Verfahrensgebiets aus unterschiedlichsten fachlichen Perspektiven: So zerfällt ein Landschaftsausschnitt einerseits in räumliche Einheiten, welche Eigentumsverhältnisse widerspiegeln (z.B. Flurstücke), und andererseits in räumliche Einheiten, welche die Bewirtschaftung betreffen (z.B. Feldstücke, Schläge, etc.). Hinzu kommen noch topographische Aspekte wie beispielsweise die Lage von Verkehrswegen, Gewässern, Landschaftselementen oder Waldflächen. Eine bedarfsgerechte Abbildung der Kulturlandschaft für Belange der ländlichen Entwicklung erfordert daher eine Mehrfachrepräsentation desselben Landschaftsausschnitts aus unterschiedlichen Blickwinkeln und mit unterschiedlicher semantischer Untergliederung.

Die an der Planung beteiligten Akteure besitzen jeweils unterschiedliche Sichten auf identische Elemente eines Landschaftsausschnitts. Vielfach liegen die Informationen der verschiedenen Akteure strukturiert nach unterschiedlichen Informationsmodellen und abgebildet in heterogenen Informationssystemen vor. Eine integrierte Sicht auf einzelne Elemente der Kulturlandschaft wird dadurch erschwert. Um eine integrierte Betrachtung einzelner Komponenten der Kulturlandschaft zu erleichtern, sind bei der Ausgestaltung des LandModell^{TUM} Konzepte zur Anreicherung einzelner Objekte um interdisziplinäre Information vorzusehen. Gleiches gilt für die Ergebnisse verschiedener Analysewerkzeuge, welche als objektive Kriterien zur Planungsunterstützung, zur objektiven Bewertung von Planungsalternativen sowie zur sachlichen Beurteilung der Ergebnisse von Flurneuordnungsverfahren heranzuziehen sind. Beispielhaft seien in diesem Zusammenhang Informationen zu Transportentfernungen (vgl. Abschnitt 8), zur allgemeinen Verkehrserschließung landwirtschaftlicher Parzellen (vgl. Abschnitt 9), zur Rolle einzelner Wege im Verkehrswegenetz (vgl. Abschnitt 10) oder aber Angaben zu arbeitswissenschaftlichen bzw. agrarökologischen Aspekten der regionalen Parzellenstruktur (vgl. Abschnitt 7) angeführt.

Aufgrund der großen Dynamik struktureller Veränderungen in der Landwirtschaft treten Veränderungen an Parzellen sehr häufig auch außerhalb von Verfahrensgebieten der Flurneuordnung auf. Diese Veränderungen finden zumeist auf privater Basis und nicht selten in Form von Flächenpacht statt, so dass ihr Auftreten nicht explizit in einem Informationssys-

tem erfasst ist. Um entsprechende Strukturveränderungsprozesse von Seiten der Ländlichen Entwicklung gestalterisch begleiten zu können, sind Informationen über deren lokales Auftreten festzuhalten (vgl. Abschnitt 6). Vor diesem Hintergrund sind im Informationsmodell Konzepte zur Abbildung sowie zur umfassenden semantischen Beschreibung von objekt- und objektartenübergreifenden Veränderungen vorzusehen.

2.5 Agrarökologie

Eine umfassende Betrachtung der raumzeitlichen Entwicklung der Kulturlandschaft ist wesentliche Voraussetzung für die Bearbeitung agrarökologischer Fragestellungen. Beispielhaft sei die Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen, die zeitliche Entwicklung des Vorhandenseins von Feldrandstrukturen, die topologischen Beziehungen zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und anderen Elementen der Kulturlandschaft oder aber die Vernetzung von Lebensräumen innerhalb der Agrarlandschaft angeführt.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich neben den bereits in den Abschnitten 2.1 und 2.2 genannten Anforderungen bezüglich der umfassenden Abbildung der Dimension Zeit und der Beschreibung regionaler Parzellenstrukturen zusätzlich der Bedarf zur Abbildung topologischer Beziehungen im Sinne einer dualen Repräsentation der Kulturlandschaft als topologisches Netzwerk flächenhafter Elemente. Zusätzlich zur Abbildung von Objekten, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Landwirtschaft stehen, sind im Modell auch umgebende Elemente wie Gewässer-, Siedlungs- und Verkehrsflächen zu berücksichtigen. In Abhängigkeit der zu bearbeitenden Fragestellungen ergibt sich unter Umständen der Bedarf einer semantischen Erweiterung des Modells im Sinne der Abbildung zusätzlicher oder semantisch differenzierterer Objekte sowie zur Anreicherung bereits im Modell abgebildeter Objektarten um weitergehende Information.

2.6 Fazit: Anforderungen an die Ausgestaltung des LandModell^{TUM}

Vor dem Hintergrund der exemplarisch angeführten Anwendungsbereiche ergeben sich für die Konzeption des LandModell^{TUM} vielfältige Anforderungen. Diese umfassen insbesondere 1. eine Abbildung grundlegender und stabiler Objekte, 2. die umfassende Modellierung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Evolution von (Geo-)Objekten, 3. eine semantische Erweiterbarkeit des Modells, 4. die Abbildung topologischer Beziehungen sowie auch 5. die Abbildung statistischer Aggregationseinheiten. Die genannten Anforderungen sollen in den folgenden Abschnitten detaillierter erläutert werden.

2.6.1 Abbildung grundlegender und stabiler Objekte

Ziel des LandModell^{TUM} ist eine raumzeitliche und skalenübergreifende Abbildung der Kulturlandschaft als komplexes System interagierender und sich verändernder Komponenten in einem zunächst anwendungsneutralen Informationsmodell. Das Informationsmodell sowie die darin abgebildeten Komponenten verstehen sich prinzipiell als Plattform zur Verknüpfung von Information verschiedener Fachdisziplinen über den Bezug auf identische Objekte.

Entsprechend dem Konzept der semantischen Anreicherung (siehe auch Abschnitt 2.6.3) sollen Informationen unterschiedlicher Fachbereiche mit Bezug auf einzelne Elemente des Informationsmodells abgebildet werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, sind im semantischen Modell einerseits grundlegende Elemente der Kulturlandschaft mit Relevanz für verschiedenste Fachdisziplinen abzubilden und andererseits die abgebildeten Objekte zeitlich möglichst lange stabil zu halten. Da sich Informationen verschiedener Fachdisziplinen auf unterschiedliche Ebenen bestehender Aggregations- bzw. Kompositionshierarchien beziehen können – dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn sich einzelne semantische Objekte aus mehreren Komponenten zusammensetzen – sind auch entsprechende Aggregationshierarchien im Modell zu berücksichtigen.

2.6.2 Umfassende Abbildung verschiedener Facetten einer zeitlichen Weiterentwicklung von Objekten

Ein wesentlicher Fokus des LandModell^{TUM} liegt auf der umfassenden Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Weiterentwicklung von räumlich-semantischen Objekten. Neben der Möglichkeit zur Rekonstruktion von Zuständen und Konstellationen verschiedener Objekte zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit sollen auch Zustandsveränderungen sowie objektübergreifende Übergänge explizit im Modell abgebildet und damit auch für aufbauende Analysen zugänglich gemacht werden. Diese Aspekte sollen in den folgenden Abschnitten etwas ausführlicher dargelegt werden.

2.6.2.1 Modellierung historischer Zustände von Realweltausschnitten

Das Monitoringsystem – und damit auch das zugrundeliegende Informationsmodell – sollte es ermöglichen, Zustände eines Realweltmodells zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit rekonstruieren zu können. Dabei sollten sowohl die Zustände einzelner Komponenten als auch Konstellationen von Objekten zu bestimmten Zeitpunkten wiederherstellbar sein.

2.6.2.2 Explizite Abbildung der Zustandsveränderungen von Objekten

Vor dem Hintergrund einer Nutzung des Informationssystems als Plattform zur interdisziplinären Verknüpfung von Information über den Bezug auf Einzelobjekte sind die im Informationssystem abgebildeten Objekte über die Zeit möglichst langfristig stabil zu halten. Gleichzeitig sollen über die Lebensdauer von Objekten hinweg Zustandsveränderungen im Modell abgebildet werden können. Die Versionierung von Objektzuständen hat dabei in einer Weise zu erfolgen, welche auch eine einfache semantische Anreicherung von Objekten um zusätzliche Attribute anderer Fachdisziplinen erlaubt (vgl. Abschnitt 2.6.3).

Zustandsveränderungen einzelner Objekte sollen weiterführenden Analysen nach Möglichkeit einfach zugänglich sein, weshalb diese auch explizit im Informationsmodell abzubilden sind. Damit soll es möglich sein, neben der Rekonstruktion von Objektzuständen zu verschiedenen Zeitpunkten der Vergangenheit für einzelne Objekte auch Zeitreihenanalysen auf Attributebene durchführen zu können.

2.6.2.3 Explizite Abbildung von Übergängen zwischen Objekten über die Zeit

Über die Rekonstruktion von Objektzuständen und Zustandsveränderungen hinaus sind für eine Vielzahl von Analysen insbesondere auch Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit von großem Interesse. Im Informationsmodell sind daher sowohl objekt- wie auch objektartenübergreifende Veränderungen über die Zeit in Form von Übergängen explizit abzubilden und damit Analysen zugänglich zu machen.

Für die Konzeption des Informationsmodells besteht daher eine grundlegende Anforderung darin, komplexe Übergangsbeziehungen zwischen Einzelobjekten der selben oder aber auch unterschiedlicher Art abbilden zu können. Die Modellierung hat daher in einer Weise zu erfolgen, welche die Übergänge zwischen Objekten über die Zeit kleinteilig und semantisch klar beschreibt.

2.6.3 Semantische Anreicherung des Modells

Wie bereits in Abschnitt 2.6.1 erläutert, versteht sich das LandModell^{TUM} als zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell der Kulturlandschaft, welches grundlegende Elemente mit Relevanz für verschiedene Fachdisziplinen beschreibt. Das Informationsmodell wird dabei als Plattform zur Verknüpfung interdisziplinärer Information betrachtet. Für unterschiedliche Betrachtungen der Kulturlandschaft kann es daher erforderlich sein, bestehende Objekte um zusätzliche Eigenschaften anzureichern, zusätzliche Objektarten zu ergänzen oder aber eine systematische Erweiterung des Informationsmodells für spezifische Anwendungen vorzunehmen. Für die Ausgestaltung des Informationsmodells ergibt sich hieraus die Anforderung, die Erweiterbarkeit bzw. die semantische Anreicherung des Modells bereits im Kern des Modells zu verankern.

2.6.4 Abbildung topologischer Beziehungen

Neben einer rein topographischen Abbildung der einzelnen Elemente der Kulturlandschaft ist insbesondere auch die Modellierung topologischer Beziehungen zwischen Objekten für verschiedenste Fragestellungen von Relevanz. Topologische Aspekte treten dabei sowohl in räumlicher (z.B. räumliches Aneinandergrenzen von Geoobjekten) als auch in zeitlicher Hinsicht (z.B. Übergänge zwischen Objekten; vgl. Abschnitt 2.6.2.3) in Erscheinung. Die Abbildung räumlich-topologischer wie auch zeitlich-topologischer Beziehungen zwischen Objekten ist daher eine grundlegende Anforderung an das zu entwickelnde Informationsmodell.

2.6.5 Abbildung statistischer Aggregationseinheiten

Eine wesentliche Aufgabe des hier entwickelten Informationssystems besteht in einem flächendeckenden und zeitlich fortlaufenden Monitoring der Kulturlandschaft. Im Informationsmodell sind daher neben den Bestandteilen der Kulturlandschaft insbesondere auch verschiedene räumliche Einheiten als Grundlage für eine statistische Beschreibung verschiedener Phänomene der Realwelt abzubilden. Diese räumlichen Einheiten sollen neben administrativen Einheiten insbesondere auch künstlich geschaffene Einheiten wie beispielsweise

Rasterzellen verschiedener Kantenlänge beinhalten (Abbildung 2). Letztgenannte unterliegen im Gegensatz zu administrativen Einheiten keinerlei Veränderung über die Zeit und weisen damit eine langfristige Stabilität beispielsweise für die statistische Betrachtung räumlicher Muster auf.

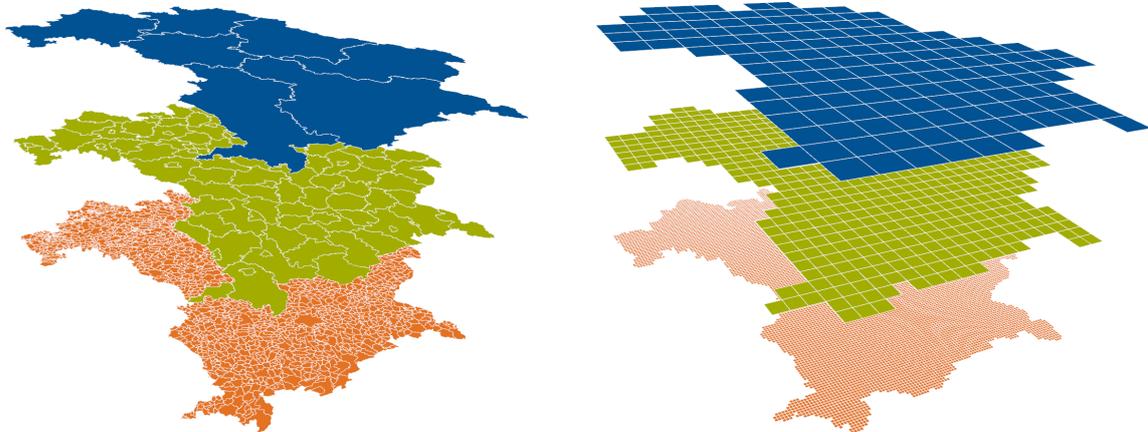


Abbildung 2: Administrative Gebiete (links) und Rasterzellen verschiedener Kantenlänge (rechts) als räumliche Einheiten zur statistischen Aggregation

3 Grundlagen zur raumzeitlichen Modellierung der Kulturlandschaft

Vor dem Hintergrund der bereits erläuterten Ziele und Anforderungen an das LandModell^{TUM} sollen in diesem Abschnitt zunächst die Grundlagen zur raumzeitlichen Abbildung der Kulturlandschaft in Form eines Informationsmodells dargelegt werden. Das Kapitel beginnt mit einer Beschreibung der grundlegenden Ansätze zur Modellierung von (Geo-)Information. Es folgt eine Zusammenstellung bestehender Konzepte zur Abbildung der Zeit als zusätzliche Dimension räumlich-semantischer Objekte sowie eine ausführliche Darstellung bestehender Informationsmodelle zur semantischen Beschreibung der Kulturlandschaft. Die Konzepte Repräsentation der Zeit sowie auch die Modellierungsansätze bestehender Informationsmodelle der Kulturlandschaft werden abschließend zusammengefasst und vor dem Hintergrund der Zielstellungen dieser Arbeit diskutiert.

3.1 Standard- und normbasierte Modellierung von Geoinformation

Zur semantischen Beschreibung und Strukturierung von (Geo-)Information finden sich verschiedene Modellierungssprachen und -konzepte. Beispielhaft seien an dieser Stelle das *Entity-Relationship-Modell* (ER-Modell), die vom *World Wide Web Consortium* (W3C) spezifizierte und auf dem *Resource Description Framework* (RDF) basierende *Web Ontology Language* (OWL) oder aber das schweizer *INTERLIS* angeführt. In der Geoinformatik hat insbesondere die Modellierungssprache *Unified Modeling Language* (UML) als graphische Notation und formale Beschreibung konzeptueller Datenmodelle eine weite Verbreitung gefunden (Bill 2016), weshalb sich die Ausführungen im Folgenden insbesondere hierauf beschränken.

Bei UML handelt es sich um eine objektorientierte Modellierungssprache aus dem Bereich der Softwareentwicklung bzw. der Modellierung von Geschäftsprozessen (Bill 2016; Object Management Group 2017). UML wird als ISO/IEC 19501:2005 (Version 1.4.2) bzw. ISO/IEC 19505-1:2012 und ISO/IEC 19505-2:2012 (Version 2.4.1) normiert. Daneben ist die Norm in der von der *Object Management Group* (OMG[®]) bereitgestellten Spezifikation in der Version 2.5.1 verfügbar, welche auch die derzeit aktuelle Version darstellt (Object Management Group 2017).

Standards und Normen bilden in der Welt der Geoinformatik eine wesentliche Voraussetzung für die Interoperabilität verschiedener Systemkomponenten, die Kompatibilität von Geoinformation sowie für die Bereitstellung bzw. den Austausch von Geoinformation über *Geodateninfrastrukturen* (GDI) (Bill 2016; Eisenhut und Kutzner 2010; Zimmermann 2011). Die Standardisierung bzw. Normierung auf internationaler Ebene wird im Bereich der Geoinformatik insbesondere vom *Open Geospatial Consortium* (OGC[®]) bzw. von der ISO - genauer vom *Technical Committee* (TC) 211 vorangetrieben (Bill 2016; Zimmermann 2011).

Daneben existieren verschiedene Normierungs- bzw. Standardisierungsaktivitäten auch auf europäischer oder auch nationaler Ebene, auf welche in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Aktivitäten findet sich in Bill (2016, S. 211 ff.).

Die Normen der ISO 191xx Familie bilden eine wesentliche Grundlage für die interoperable Modellierung von Geoinformation. Die Normenfamilie umfasst derzeit insgesamt mehr als 60 Einzelnormen, Vornormen und Normenentwürfe, die jeweils einzelne Aspekte der Modellierung von Geoinformation abdecken. An dieser Stelle soll lediglich auf grundlegende Normen für die Modellierung von Geoinformation eingegangen und deren Inhalt kurz beleuchtet werden.

Die Spezifikation *ISO/TS 19103:2005 Geoinformation - Konzeptuelle Beschreibungssprache* legt die Modellierungssprache UML in Kombination mit der *Object Constraint Language* (OCL) als konzeptionelle Schemasprache (*conceptual schema language CSL*) für die Spezifikation computerinterpretierbarer Modelle bzw. Schemata für geografische Information fest (ISO 2005b). ISO/TS 19103:2005 enthält zudem eine Reihe von Vorgaben, in welcher Weise UML für die Modellierung geografischer Information bzw. für die Erstellung von Servicemodellen einzusetzen ist, um ein höchstes Maß an Interoperabilität sicherzustellen. Neben der Festlegung von UML in Kombination mit OCL als formale und von einer Konkreten Implementierung unabhängigen CSL für die Normen der ISO 191xx-Familie definiert die Norm auch bereits einige grundlegende Datentypen.

Die Norm *DIN EN ISO 19109:2006 Geoinformation - Regeln zur Erstellung von Anwendungsschemata* definiert grundlegende Aspekte zur Erstellung sogenannter Anwendungsschemata sowie Prinzipien zur Definition von *Features* und ihrer Eigenschaften aus einem *Universum des Diskurses* (ISO 2006). Das sog. *General Feature Model* (GFM)-Konzept bildet einen wesentlichen Inhalt der Norm DIN EN ISO 19109:2006. Das GFM entspricht dabei einem Metamodell zur Definition von *Features*. Als *Features* werden gemeinhin Abstraktionen von Realweltphänomenen betrachtet, die sich anhand bestimmter Kriterien einem Typ sog. *FeatureType* zuordnen lassen. *FeatureTypes* werden nach DIN EN ISO 19109:2006 durch einen *Namen*, *Attribute*, *Assoziationsrollen* und das *Objektverhalten* definiert (ISO 2006). Zusätzliche Konzepte decken die Beziehungen zwischen *FeatureTypes*, *Spezialisierung* und *Generalisierung* zwischen verschiedenen *FeatureTypes* sowie Einschränkungen für *FeatureTypes* ab (ISO 2006).

Grundlegende Konzepte zur Abbildung der räumlichen Eigenschaften geografischer Objekte sowie auch die Beschreibung grundlegender räumlicher Operationen sind Gegenstand der Norm *DIN EN ISO 19107:2003 Geoinformation – Raumbezugsschema* (ISO 2003). Dabei werden neben geometrischen auch topologische Aspekte adressiert.

Eine Voraussetzung für die Abbildung geometrischer Eigenschaften geographischer Objekte bildet die Normen *DIN EN ISO 19111:2007 Geoinformation – Koordinatenreferenzsysteme* und *DIN EN ISO 19111-2:2012 Geoinformation – Koordinatenreferenzsysteme – Teil 2: Erweiterung auf parametrisierte Werte*. Darin wird ein konzeptuelles Schema für die räumliche Verortung mittels Koordinaten definiert.

Von Relevanz für die Abbildung der zeitlichen Aspekte von Geoinformation sind insbesondere die Normen *DIN EN ISO 19108:2005 Geoinformation – Zeitliches Schema* und *DIN EN ISO 19141:2008 Geoinformation – Schema für sich bewegende Objekte*. Eine ausführliche Beschreibung dieser Normen ist Gegenstand von Abschnitt 3.2.5.

3.2 Zeit und Geoinformation

Neben Raum und Semantik bildet die Zeit die dritte grundlegende Komponente von Geoinformation. Die Dimension Zeit tritt dabei im Kontext von Geoinformation in verschiedenen Facetten in Erscheinung. Die folgenden Abschnitte erläutern kurz grundlegende Eigenschaften des Phänomens Zeit und beschreiben anschließend die bestehenden Konzepte zur Abbildung der Zeit im Kontext von Geoinformation.

3.2.1 Grundlegende Eigenschaften des Phänomens Zeit

Im Allgemeinen handelt es sich bei der Zeit um ein kontinuierliches, eindimensionales und von der Vergangenheit in die Zukunft gerichtetes Phänomen (stellvertretend: ISO 2005a; Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2001, 2005; Renolen 1999; Worboys und Duckham 2004). Grundsätzlich ergeben sich zwischen Raum und Zeit zahlreiche Analogien (Langran und Chrisman 1988; Peuquet 1994, 2005; Wilcox et al. 2000). So lässt sich die Zeit – analog dem Raum – sowohl als kontinuierliches wie auch als diskretisierbares Phänomen abbilden (stellvertretend: Allen 1983; Bill 2016; Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2005; Worboys und Duckham 2004). Die durch Diskretisierung gebildeten Elemente verfügen dabei einerseits über eine Geometrie und Metrik (Bill 2016; ISO 2005a; Worboys und Duckham 2004) sowie andererseits auch über eine Topologie (Allen 1983; ISO 2005a; Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2001). Details zur Modellierung geometrischer und topologischer Eigenschaften zeitlicher Phänomene werden im Abschnitt 3.2.5 detaillierter beleuchtet.

Neben der typischerweise gebräuchlichen Betrachtung der Zeit als eindimensional verlaufendes, lineares Phänomen (sog. *linear time*; Hubbard und Hornsby 2011; Lohfink et al. 2007; Peuquet 2001; Renolen 1999; Worboys und Duckham 2004) finden sich in der Literatur auch Ansätze einer Verzweigung der Zeit (sog. *branching time*). Eine Verzweigung der Zeit erlaubt die Abbildung mehrerer Alternativzustände zum gleichen Zeitpunkt der Vergangenheit oder der Zukunft (Hubbard und Hornsby 2011; Lohfink et al. 2007; Peuquet 2001; Renolen 1999; Worboys und Duckham 2004). Mögliche Anwendungen für das rückwärts gerichtete Verzweigen der Zeit (= mehrere Alternativen der Vergangenheit) ergeben sich beispielsweise in der Archäologie, der Forensik oder der Unfallforschung (Hubbard und Hornsby 2011). Dem gegenüber ermöglicht die zeitlich vorwärts gerichtete Verzweigung eine Abbildung mehrerer Szenarien der Zukunft, welche insbesondere für die Planung bzw. Anwendungen im Bereich des Geodesigns eine Fülle an Möglichkeiten zur Bewertung von Planungsszenarien ermöglicht (Hubbard und Hornsby 2011; Lohfink et al. 2007; Renolen 1999; Worboys und Duckham 2004). Hubbard und Hornsby (2011) beschreiben in ihrer Arbeit ein allgemeines Verzweigungskonzept, welches eine Abbildung hypothetischer Abfolgen von Ereignissen ermöglicht. Wesentliche Elemente dieses Konzepts sind insbesondere auch die Elemente Divergenz und Konvergenz, welche einerseits ausgehend von einem Zweig eine Aufspaltung in mehrere Szenarien (= Zweige) und andererseits auch eine Zusammenführung mehrerer Szenarien zu einem Zweig ermöglichen.

Neben dem linearen Verlauf des Phänomens Zeit und der Verzweigung mehrerer zeitgleich gültiger Szenarien der Vergangenheit bzw. der Zukunft können einige Phänomene auch periodische bzw. zyklische Muster aufweisen (Hubbard und Hornsby 2011; Peuquet 2001; Renolen 1999; Worboys und Duckham 2004). Beispielhaft für derartige Phänomene sind jahres- bzw. tageszeitliche Temperaturverläufe, Gezeiten oder Mondphasen anzuführen.

3.2.2 Konzepte zur Historisierung von Geoobjekten

In der Literatur finden sich verschiedene Herangehensweisen zur Historisierung von Geoobjekten in Geodatenbeständen. Verbreitet sind zur Historisierung von Objekten die Konzepte *Schnappschuss-Ansatz* und *Objektlebensdauer* anzutreffen, die in den folgenden beiden Abschnitten einschließlich ihrer Vorzüge und Einschränkungen vorgestellt werden.

3.2.2.1 Schnappschuss-Ansatz

Der *Schnappschuss-* bzw. *Snapshot-Ansatz* stellt die einfachste Form einer Historisierung von Geoobjekten dar (stellvertretend: Bill 2016; Galton 2004; Gantner et al. 2013; Langran und Chrisman 1988; Renolen 1999; Yuan 1999). Bei diesem Ansatz wird zu verschiedenen Zeitpunkten ein vollständiger *Schnappschuss* eines Geodatenbestandes erzeugt und in Form sog. *Zeitscheiben* mit Angaben zur Gültigkeit des jeweiligen Zustands gespeichert. Eine Zeitscheibe repräsentiert dabei jeweils eine vollständige Kopie eines Datenbestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wie Abbildung 3 zeigt, repräsentieren die Objekte der einzelnen Schnappschüsse jeweils eigenständige und von den Objekten anderer Zeitscheiben unabhängige Elemente (Yuan 1999).

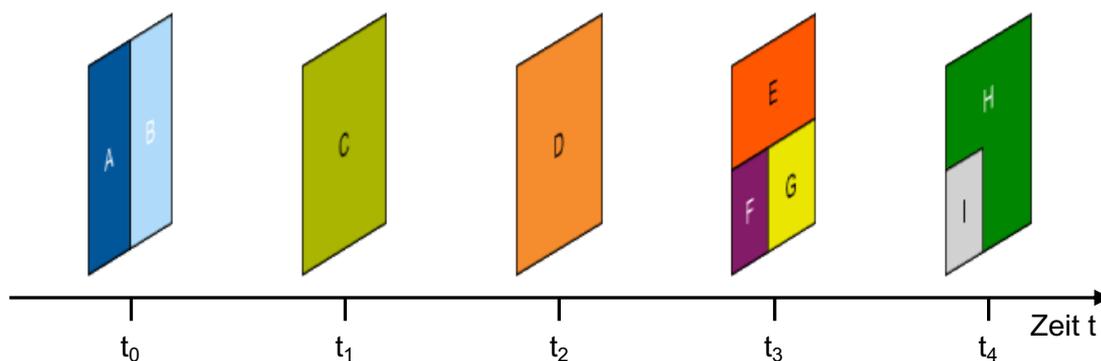


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Schnappschuss-Ansatzes zur Historisierung von Geoobjekten; die in den einzelnen Zeitscheiben enthaltenen Objekte (A bis I) stehen in keiner Beziehung zu Objekten anderer Zeitscheiben und stellen daher jeweils eigenständige Objekte dar

Der *Schnappschuss-Ansatz* eignet sich gleichermaßen für eine Historisierung von objekt- und feldbasierter Information. Die Erstellung von *Schnappschüssen* ist zumeist unabhängig von Veränderungen der Realwelt bzw. des Geodatenbestandes und erfolgt beispielsweise in definierten Zeitintervallen. Alternative Strategien erzeugen neue Schnappschüsse eines Datenbestandes sobald eine Änderung an einem Objekt eintritt.

Da die in den einzelnen Zeitscheiben abgebildeten Objekte völlig eigenständige Elemente darstellen, stehen auch Objekte, welche in unterschiedlichen Zeitscheiben eigentlich identische und unveränderte Realweltphänomene repräsentieren, in keinerlei Zusammenhang zueinander. Da jeder Schnappschuss unabhängig von Objektveränderungen eine vollständige Kopie des jeweiligen Geodatenbestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt repräsentiert, führt dieser Ansatz zwangsläufig zu einer zunehmenden Redundanz (Gantner et al. 2013; Hornsby und Egenhofer 2000; Hosse 2005; Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2005; Renolen 1999). Diese Redundanz bewirkt einerseits die Zunahme des Speicherplatzbedarfes und birgt andererseits insbesondere die Gefahr des Auftretens von Inkonsistenzen.

Hinsichtlich der Erkennung von Veränderungen treten typischerweise bei Verwendung des Schnappschuss-Ansatzes sog. *verborgene Strukturen* auf (Gantner et al. 2013; Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2005). So sind Veränderungen zwischen verschiedenen und zunächst voneinander unabhängigen Zeitscheiben des Datenbestandes ausschließlich implizit gespeichert und damit nur durch Überlagerung zweier Zeitscheiben erkenn- bzw. analysierbar (Bill 2016; Gantner et al. 2013; Hornsby und Egenhofer 2000; Langran und Chrisman 1988; Lohfink et al. 2007; Peuquet 2005; Worboys und Duckham 2004). Der genaue Zeitpunkt der Entstehung, der Veränderung oder des Untergangs von Geoobjekten ist nicht exakt auf der Zeitachse zu verorten sondern lediglich einem Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitscheiben zuzuordnen (Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2005; Worboys und Duckham 2004). Darüber hinaus bleiben Veränderungen grundsätzlich verborgen, sofern sie nicht in einer Zeitscheibe erfasst sind (Langran und Chrisman 1988; Peuquet 2005; Worboys und Duckham 2004).

3.2.2.2 Abbildung von Objektlebensdauern

Heutige Ansätze der objektbasierten Modellierung von Geoinformation gehen typischerweise davon aus, dass sich Phänomene der Realwelt anhand thematischer, topologischer und geometrischer Eigenschaften klar von anderen Phänomenen abgrenzen lassen (Bill 2016; Gantner et al. 2013). Neben einer geometrischen Ausdehnung können Geoobjekte grundsätzlich auch eine zeitliche Ausdehnung besitzen (Worboys 1994). Diese auch als *Lebenszeitintervall* bezeichnete zeitliche Ausdehnung von Geoobjekten wird durch den Entstehungs- und Untergangszeitpunkt eines Objekts begrenzt. Die Lebensdauer einzelner Objekte ist dabei unabhängig von der Lebensdauer anderer Objekte (Yuan 1999). Abbildung 4 veranschaulicht das Konzept der Abbildung von Objektlebensdauer anhand eines schematischen Beispiels.

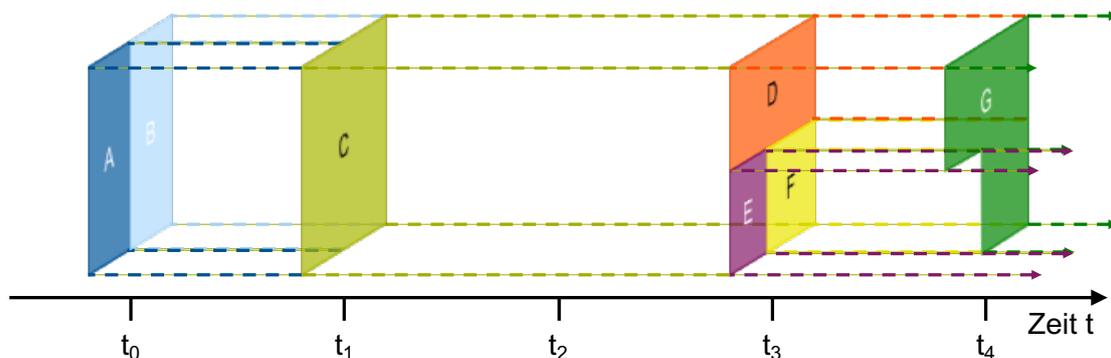


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Abbildung von Objektlebensdauern; bei diesem Ansatz verfügen einzelne Geoobjekte neben der räumlichen auch über eine zeitliche Ausdehnung (in der Darstellung als gestrichelte Linien symbolisiert)

Die Angaben zum Lebenszeitintervall können sich dabei sowohl auf die Existenz eines Phänomens in der Realwelt oder aber auf die Gültigkeit eines Objekts innerhalb eines Datenbestandes beziehen. Nach Snodgrass und Ahn (1985), Lohfink et al. (2007) und Renolen (1999) lassen sich folgende Arten der Abbildung von Lebenszeitintervallen unterscheiden:

- **statische Repräsentation:** Bei diesem Ansatz sind weder Angaben zum Lebenszeitintervall in der Realwelt noch innerhalb eines Datenbestandes verfügbar.

- **historische Repräsentation:** Hier beschränken sich die Angaben zum Lebenszeitintervall auf die Lebensdauer eines Objekts in der Realwelt.
- **Transaktionsrepräsentation bzw. Rollback-Modell:** Die Angaben zum Lebenszeitintervall beschränken sich auf die Transaktionszeitpunkte im Zusammenhang mit einem Objekt innerhalb eines Datenbestandes.
- **bitemporale Repräsentation:** Bei diesem Ansatz verfügen Objekte über Angaben zu deren Lebenszeitintervall in der Realwelt sowie auch innerhalb des Datenbestandes. Das Lebenszeitintervall in der Realwelt ist orthogonal zum Lebenszeitintervall innerhalb eines Datenbestandes. Diese Form der Repräsentation ist in geographischen Informationssystemen häufig anzutreffen.

In engem Zusammenhang mit der Objektlebensdauer steht insbesondere auch die Identität einzelner Objekte (Del Mondo et al. 2013; Gantner et al. 2013; Peuquet 2005). Die Identität ist dabei nach Hornsby und Egenhofer (2000) diejenige Eigenschaft eines Objekts, welche dieses unabhängig von dessen thematischen oder geometrischen Eigenschaften unterscheidbar gegenüber anderen Objekten macht. Damit bildet die Objektidentität den wesentlichen Schlüssel zum Nachweis der Existenz eines Objekts über einen bestimmten Zeitraum sowie zur Abbildung und Verfolgung von thematischen wie geometrischen Veränderungen über die Zeit (Del Mondo et al. 2013; Hornsby und Egenhofer 2000). Es besteht daher vielfach ein grundlegendes Interesse, die Identität möglichst langfristig aufrecht zu erhalten. Daher sind klare Regeln für *objektbildende* und *nicht-objektbildende Veränderungen* an (Geo-)Objekten festzulegen (Peuquet 2005). Treten an einem Objekt Veränderungen auf, so können diese als Zustandsveränderung eines weiterhin bestehenden Objekts interpretiert werden (= Versionierung) oder aber auch den Untergang und die Entstehung eines neuen Objekts bedeuten. In der Literatur finden sich unterschiedliche Herangehensweisen zur Versionierung von Objektzuständen sowie zur Abbildung von objektübergreifenden Übergangsbeziehungen, die in den beiden folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

3.2.3 Konzepte zur Versionierung von Objektzuständen

Nach Del Mondo et al. (2013) entsprechen raumzeitliche Objekte einer Abstraktion von Phänomenen der Realwelt, welche eine eigene Identität besitzen, sich semantisch einer Klasse zuordnen lassen und über zeitabhängige thematische und geometrische Eigenschaften verfügen. Entsprechend erfordert die Modellierung solcher Objekte Konzepte, welche eine Historisierung der Entwicklung von Zuständen über die Zeit ermöglichen und dadurch eine Betrachtung der zeitlichen Evolution von Objekten zulassen.

In Anlehnung an Käfer et al. (1990) bzw. Renolen (1999, 2000) lassen sich grundsätzlich drei Kategorien zeitlicher Zustandsveränderungen von Objekten unterscheiden:

- **Objekte mit stufenweise konstanten Zuständen:** Der Zustand eines Geoobjekts ist über einen längeren Zeitraum konstant und ändert sich durch bestimmte Ereignisse abrupt (z.B. Zustand einer Straße).
- **Objekte mit kontinuierlich veränderlichen Zuständen:** In diesem Fall ändern sich die Zustände von Objekten kontinuierlich über die Zeit (z.B. die Ausdehnung eines Gletschers). Attribute stellen dabei vielfach eine Funktion der Zeit dar (Bill 2016).

- **Objekte mit diskreten Zuständen:** Zustände dieser Art werden typischerweise ausschließlich zu bestimmten Zeitpunkten erfasst (z.B. Niederschlagsmessung). In den Zeitspannen zwischen Beobachtungen sind die Zustände der Objekte nicht erfasst.

Zustandsveränderungen von Geoobjekten lassen sich nach Peuquet (2005) grundlegend nach der Dauer des Veränderungsvorgangs (abrupt, kontinuierlich) sowie nach der Häufigkeit des Auftretens (z.B. einmalig oder sporadisch) unterscheiden. Dabei können Veränderungen sowohl semantische bzw. thematische als auch geometrische Eigenschaften von Geoobjekten betreffen (Yuan 1999).

Zustandsveränderungen einzelner Eigenschaften von Objekten können in unmittelbarem Zusammenhang mit der Lebensdauer von Objekten bzw. Objektversionen stehen und entsprechend zum Untergang bestehender und zur Entstehung neuer Objekte bzw. Objektversionen führen (Gantner et al. 2013; Lohfink et al. 2007; Steiner und Norrie 1997). Alternativ dazu können die Attributzustände eines Objekts über eine jeweils eigene Versionierung und damit jeweils über eigene Gültigkeitszeitintervalle verfügen (Erwig und Schneider 1999; Gantner et al. 2013; Lohfink et al. 2007; Peuquet 2005). Die Lebensdauer betreffender Objekte bleibt dabei bestehen und es werden lediglich veränderte Attributwertbelegungen gespeichert. Voraussetzung hierfür ist die Tatsache, dass ein Geoobjekt einerseits selbst über eine zeitliche Komponente verfügt und die Objekte versionierbare räumliche und nicht-räumliche Komponenten beinhalten (Peuquet 2005).

Eine weitere Möglichkeit besteht in einer vollständigen Versionierung von Objekten. Nicht objektbildende Veränderungen bewirken dabei die Historisierung von Objekten in Form von Objektversionen, welche zumeist ein vollständiges Abbild eines Objekts einschließlich sämtlicher Eigenschaften darstellen. Die Identität (und insbesondere der Identifikator) eines Objekts bleibt dabei nach außen hin bestehen und historische Zustände werden versioniert in Objektbehältern/Containern vorgehalten. Treten hingegen objektbildende Veränderungen an Objekten auf, so endet das Lebenszeitintervall eines Objekts.

Übergänge zwischen Objektversionen lassen sich wie beispielsweise im *Feature Evolution Model* (FEM) von Lohfink et al. (2007, 2010) explizit abbilden. Zustandsveränderungen werden dabei als eigene Ereignisobjekte erfasst, die sich entweder als abrupte Veränderung (ohne zeitliche Ausdehnung) oder als Prozess (mit zeitlicher Ausdehnung) modellieren lassen. Die Ereignisobjekte stellen die Beziehung zwischen zwei Zuständen von Objekten über die Zeit her und verfügen über Attribute zur Beschreibung entsprechender Übergängen zwischen den Objektversionen. Übergänge zwischen Objektversionen werden als Summe von Einzelereignissen betrachtet und entsprechend abgebildet.

3.2.4 Konzepte zur Repräsentation von Übergangsbeziehungen zwischen Geoobjekten über die Zeit

Entstehung und Untergang stellen grundlegende Ereignisse im Leben von Geoobjekten dar (stellvertretend: Hornsby und Egenhofer 2000; Renolen 2000; Worboys und Duckham 2004). Im Gegensatz zu nicht-räumlichen Objekten besteht bei der Modellierung von Geoobjekten eine prinzipielle Herausforderung darin, dass sich bei der Entstehung, beim Untergang bzw. bei einer Veränderung Geoobjekte als zeitliche Nachbarn räumlich überlagern (Yuan 1999). Entsprechend ergeben sich bei der Entstehung neuer und dem Untergang alter Objekte Interaktionen zwischen zeitlichen Nachbarobjekten, die auch entsprechend zu modellieren sind. So können beispielsweise neue Geoobjekte aus anderen Objekten bzw.

geometrischen Bestandteilen untergehender Objekte hervorgehen oder aber alte Geoobjekte vollständig untergehen und / oder dabei ganz oder teilweise in andere Objektarten überführt werden.

In der Literatur finden sich neben den bereits genannten Ereignissen *Entstehung* und *Untergang* folgende Arten von Übergängen zwischen Geoobjekten über die Zeit:

- **Teilung bzw. Abspaltung:** Im Falle der Teilung eines Geoobjekts gehen zwei oder mehrere Geoobjekte aus einem Geoobjekt hervor (Claramunt und Thériault 1995; Del Mondo et al. 2013; Hornsby und Egenhofer 2000; Renolen 2000; Stell 2013).
- **Zusammenlegung:** Bei der Zusammenlegung werden zwei oder mehrere Geoobjekte zu einem Geoobjekt zusammengeführt (Claramunt und Thériault 1995; Del Mondo et al. 2013; Hornsby und Egenhofer 2000; Renolen 2000; Stell 2013)
- **Reallokation:** Die Reallokation bezeichnet die Umverteilung von Geometriebestandteilen einzelner Geoobjekte. Entsprechend gehen durch Kombinationen aus Zusammenlegung und Zerteilung aus zwei oder mehreren Geoobjekten zwei oder mehr andere Geoobjekte hervor (Claramunt und Thériault 1995; Renolen 2000)

Die genannten Übergänge zwischen Objekten über die Zeit können dabei Geoobjekte der selben Art betreffen oder aber auch objektartenübergreifend stattfinden (Worboys und Duckham 2004). Zudem können derartige Übergänge als zeitdiskrete Ereignisse (ohne zeitliche Ausdehnung) oder aber als Prozesse (mit zeitlicher Ausdehnung) auftreten (Hornsby und Egenhofer 2000; Renolen 1999). Zeitliche Übergangereignisse können einerseits dauerhafte Veränderung von Objekten (Untergang bzw. Entstehung) bedeuten oder aber auch lediglich zu einer temporären und reversiblen Zustandsveränderung führen. So können beispielsweise einzelne Geoobjekte nur zeitweise verschwinden und zu einem späteren Zeitpunkt an gleicher oder anderer Stelle wieder auftauchen (Peuquet 2005; Renolen 2000; Worboys und Duckham 2004).

Für die Notation von objektübergreifenden Veränderungen von Geoobjekten finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze. An dieser Stelle soll stellvertretend für viele die von Renolen (1999) entwickelte *History Graph Notation* herausgegriffen werden. Die Notation dient der expliziten Abbildung von Beziehungen zwischen zeitlich benachbarten Objekten bzw. Objektzuständen. Renolen (1999) unterscheidet dabei zwischen Zuständen und Veränderungen als grundlegende Aspekte der Dichotomie der Zeit. Die Verbindung zwischen zeitlichen Nachbarn (Vorgänger- bzw. Nachfolgerobjekte) wird dabei über Ereignisse bzw. Veränderungen repräsentiert. Die Notation erlaubt sowohl eine Abbildung von abrupten Veränderungsereignissen als auch eine Darstellung von Veränderungsprozessen, welche sich über einen gewissen Zeitraum erstrecken.

Zur Abbildung von Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen von Objekten bzw. Objektversionen sowie zur Modellierung objektübergreifender Veränderungen dienen in der Literatur zumeist Graphstrukturen, mit deren Hilfe sich Verbindungen zwischen zeitlich-topologischen Nachbarn repräsentieren lassen (stellvertretend: Del Mondo et al. 2013; Wilcox et al. 2000; Yuan 1999). So verwendet beispielsweise Wilcox et al. (2000) eine Graphstruktur zur Verknüpfung von Geoobjekten aufeinanderfolgender Schnappschüsse. In seinem Beispiel geht es um die Modellierung kontinuierlicher Übergänge zwischen Geoobjekten über die Zeit, welche in aufeinanderfolgenden Schnappschüssen festgehalten sind. Die Objekte in einzelnen Schnappschüssen entsprechen den Knoten eines Graphen, die Übergänge sind als Kanten modelliert. Mit Hilfe der Graphstruktur ist es dabei möglich, die Entstehung, den Untergang, die Teilung, die Zusammenlegung sowie auch den Fortbestand von Geoobjekten in

Schnappschüssen abzubilden. Der Ansatz fokussiert sich ausschließlich auf die Abbildung der zeitlichen Nachbarschaft von Geoobjekten, die aus Überlappung von Objekten unterschiedlicher Zeitscheiben abgeleitet wird. Die einzelnen Geoobjekte verfügen dadurch über keine eigene Lebensdauer - sie repräsentieren lediglich den Zustand zu einem Zeitpunkt.

Auch Yuan (1999) verwendet im Rahmen der Konzeption einer *Three-Domain Representation* zur Abbildung zeitlicher Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen eine Graphstruktur. Ein ähnlicher Ansatz findet sich in Del Mondo et al. (2013), wo eine Graphstruktur zur Abbildung der Abstammungsbeziehung zwischen Geoobjekten über die Zeit dient. Auch hier entsprechen Objekte den Knoten und zeitliche Übergänge zwischen diesen den Kanten des Graphen. Der Ansatz von Del Mondo et al. (2013) beinhaltet zudem einen formalisierten Ansatz zur Überprüfung der Konsistenz von Übergängen zwischen Objekten über die Zeit. Die Ansätze von Yuan (1999), Wilcox et al. (2000) und Del Mondo et al. (2013) nutzen jeweils Graphen zur Abbildung von Übergängen zwischen Geoobjekten, die keine zeitliche Ausdehnung besitzen.

3.2.5 Internationale Normen zur Modellierung der Dimension Zeit im Zusammenhang mit Geoinformation

Bereits in der Norm DIN EN ISO 19109:2006 (siehe Abschnitt 3.1) werden Grundlagen zur konzeptuellen Abbildung der Dimension Zeit bei der Modellierung von Anwendungsschemata gelegt. So beschreibt *DIN EN ISO 19109:2006* mit den Konzepten *GF_TemporalAttributeType* und *GF_TemporalAssociationType* Ansätze zur Abbildung zeitlicher Eigenschaften und zeitlicher Beziehungen zwischen *FeatureTypes*.

Gemäß den Vorgaben in *DIN EN ISO 19109:2006* soll jegliche Abbildung zeitlicher Aspekte unter Berücksichtigung der *DIN EN ISO 19108:2005 Geoinformation - Zeitliches Schema* erfolgen. *DIN EN ISO 19108:2005* beinhaltet eine Reihe grundlegender Konzepte für die Modellierung zeitlicher Eigenschaften von Geoobjekten. Diese Konzepte erstrecken sich sowohl auf die Modellierung temporaler Eigenschaften von Geoobjekten, die Abbildung des Verhaltens von Geoobjekten über die Zeit, die zeitliche Gültigkeit von Beziehungen zwischen Objekten als auch auf die Erfassung zeitlicher Aspekte als Metainformation geografischer Daten (ISO 2005a). Neben geometrischen und topologischen Grundprimitiven (Zeitpunkt und Zeitspanne bzw. Knoten und Kanten), Operationen zur Rückgabe zeitlicher Abstände, Zeitdauern, relativer Positionen und zeittopologischen Beziehungen zwischen Grundprimitiven beschreibt die Norm auch verschiedene Zeitreferenzsysteme. Die Modellierung ähnelt damit deutlich der Modellierung räumlicher Objekte im Sinne der *DIN EN ISO 19107:2005* bzw. *DIN EN ISO 19111:2007*.

Zur Modellierung zeitlicher Aspekte im Zusammenhang mit Geoobjekten beschreibt die Norm ISO 19108:2005 Erweiterungen des *General Feature Models* aus *DIN EN ISO 19109:2006*. Diese Erweiterungen betreffen insbesondere die Metaklassen aus *DIN EN ISO 19109:2006* zur Modellierung von:

- **Attributen:** Geoobjekte lassen sich über Zeitpunkte oder Zeitspannen entlang der Zeitachse verorten. Die Erweiterung erfolgt in Form einer Spezialisierung der Metaklasse *GF_TemporalAttributeType* um zwei Metaklassen *TM_EventType* und *TM_StateType*.
- **Operationen:** sie dienen zur Modellierung des Verhaltens einzelner *Features* als Funktion der Zeit.

- **Assoziationen:** Durch Erweiterung der Metaklasse *GF_TemporalRelationship* um zwei Metaklassen *TM_SimpleRelationship* und *TM_FeatureSuccession* ist es möglich, zeitliche Beziehungen zwischen *Feature*-Instanzen herzustellen. Mit Hilfe dieser Metaklassen lassen sich in einem Anwendungsschema einerseits Beziehungen zwischen unterschiedlichen Klassen mit zeitlich begrenzter Gültigkeit sowie andererseits auch zeitliche Abfolgen im Sinne von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen modellieren. Im Anwendungsschema sollen dazu Assoziationsklassen genutzt werden, welche im Falle der Modellierung einer zeitlichen Abfolge von Vorgängern und Nachfolgern auch reflexiv ausgebildet sein kann.

Die Modellierung von *Vorgänger-Nachfolger-Übergängen* impliziert zunächst, dass *Feature*-Instanzen durch andere *Feature*-Instanzen ersetzt werden und bei diesem Vorgang die Lebensdauer von Vorgänger-Instanzen endet und gleichzeitig das *Lebenszeitintervall* der Nachfolger-Instanzen beginnt. Die Norm unterscheidet für die zeitliche Übergangsbeziehungen zwischen *Features* drei grundlegende Kategorien von Übergängen bzw. Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen:

- **Verschmelzung:** Bei der Fusion von *Feature*-Instanzen werden zwei *Feature*-Instanzen der selben Art zu einer *Feature*-Instanz verschmolzen
- **Teilung:** Wird eine *Feature*-Instanz in zwei oder mehrere *Feature*-Instanzen der selben Art aufgespalten, so wird von einer Teilung gesprochen
- **Ersetzung:** Wird eine *Feature*-Instanz durch eine andere *Feature*-Instanz einer anderen oder aber der selben Art abgelöst entspricht dies einer Ersetzung

Da diese Arten von Übergängen nur bedingt in Reinform anzutreffen sind, werden in der Norm auch vier mögliche Mischformen festgelegt. Diese sind:

- Teilung und Ersetzung
- Verschmelzung und Teilung
- Verschmelzung, Ersetzung und Teilung
- Ersetzung und Verschmelzung

Während *DIN EN ISO 19108:2005* grundlegende Konzepte und Datentypen zur Modellierung zeitlicher Aspekte beschreibt und sich dabei insbesondere auf zeitdiskrete Phänomene beschränkt, beschreibt die Norm *DIN EN ISO 19141:2008 Geoinformation – Schema für sich bewegende Objekte* Konzepte zur Abbildung sich bewegendender Körper. Die Norm enthält insbesondere Konzepte um Rotations- und Translationsbewegungen sich über die Zeit in ihrer Form nicht verändernder Geoobjekte abbilden zu können. Da die Anwendungsbereiche dieser Norm sich außerhalb der Zielstellung dieser Arbeit bewegen, wird sie an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber genannt und im Folgenden nicht weiter behandelt.

3.2.6 Zwischenfazit

In der Literatur finden sich unterschiedliche Konzepte zur Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Entwicklung von Geoobjekten. Die beschriebenen Ansätze decken zumeist lediglich einzelne Aspekte der zeitlichen Evolution von Ausschnitten der Erdoberfläche und den dort befindlichen (Geo-)Objekten ab. So fokussiert sich beispielsweise das Konzept der Objektlebensdauer oder aber die Objektversionierung insbesondere auf die Re-

konstruktion der Zustände von Geoobjekten bzw. deren Konstellation zu bestimmten Zeitpunkten der Vergangenheit oder Zukunft. Die Historisierung erfolgt zumeist über das Lebenszeitintervall einzelner Geoobjekte, welches die zeitliche Gültigkeit eines Objekt bzw. einer Objektversion angibt. Treten an einem Geoobjekt Veränderungen auf, so wird teils zwischen objektbildenden und nicht objektbildenden Veränderungen differenziert. Während objektbildende Veränderungen zum Ende des Lebenszeitintervalls eines bestehenden und ggf. zum Beginn des Lebenszeitintervalls eines neuen Geoobjekts führen, bleibt im Falle von nicht objektbildenden Veränderungen ein Geoobjekt weiterhin bestehen und es wird lediglich eine neue Version dessen erzeugt. Die Versionierung erfolgt dabei zumeist durch Speicherung einer vollständigen Kopie einer Objektversion einschließlich aller Attribute eines Objekts. Damit sind einerseits auch nicht veränderte Attributzustände mehrfach in einem Datenbestand abgespeichert und andererseits Veränderungen nicht unmittelbar für weiterführende Analysen zugänglich und daher aus dem Vergleich von Objekten bzw. Objektversionen abzuleiten. In der Literatur finden sich allerdings auch Überlegungen zur einer Versionierung von Attributzuständen. Andere Ansätze behandeln ausschließlich die Modellierung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten und lassen dabei Objektlebensdauern und insbesondere Zustandsveränderungen bestehender Objekte außer Betracht. Entsprechende Übergangsbeziehungen werden zumeist unter Verwendung graphbasierter Ansätze modelliert, welche eine Beziehung zwischen Vorgänger- und Nachfolgerobjekten herstellen. Dabei gehen die bestehenden Ansätze zumeist davon aus, dass Objekte vollständig in anderen aufgehen bzw. lediglich aus einem anderen Objekt hervorgehen. Eine Reallokation von Teilbereichen einzelner Objekte ist bislang nicht umfassend adressiert. Die bestehenden Konzepte beschränken sich zumeist auf ausschließlich auf die Ebene von Objekten, nicht aber auf die Ebene der Einzelschicksale von Geometriefragmenten. Damit erreichen die bestehenden Konzepte zur Abbildung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten nicht die für die zur Bearbeitung der Fragestellungen des LandModell^{TUM} erforderliche geometrische Kleinteiligkeit und räumlich-semantische Tiefe.

In diesem Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten zur Einordnung zeitlicher Phänomene aufgezeigt. Für die Konzeption des LandModell^{TUM} spielen für die Bearbeitung der in dieser Arbeit behandelten Forschungsfragen insbesondere zeitdiskrete Veränderungen eine wesentliche Rolle. Innerhalb der Kulturlandschaft erfolgen zahlreiche Prozesse kontinuierlich. Derartige Prozesse sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, sollten aber in weiterführenden Arbeiten näher untersucht werden.

Einschlägige Normen der ISO 191xx Familie beschreiben diverse Konzepte zur Abbildung von verschiedenen Facetten der zeitlichen Entwicklung von Geoobjekten. Im Hinblick auf Aspekte der Interoperabilität und Maschineninterpretierbarkeit sind diese für die Konzeption des LandModell^{TUM} zu berücksichtigen.

3.3 Ausgewählte Informationsmodelle zur Repräsentation der Kulturlandschaft

Zahlreiche Informationsmodelle beschäftigen sich mit einer Abbildung der Kulturlandschaft. Häufig handelt es sich bei diesen um Fachinformationsmodelle, welche zumeist einen bestimmten fachlichen Fokus auf einzelne Komponenten der Kulturlandschaft besitzen.

Die folgenden Abschnitte greifen verschiedene Informationsmodelle heraus, welche unterschiedliche sowie jeweils mehr oder weniger anwendungsbezogene Sichten auf die Kul-

turlandschaft aufweisen. Der Überblick beginnt mit internationalen Normen und Standards und geht über europäische Richtlinien hin zu nationalen Informationsmodellen der Kulturlandschaft. Den Abschluss der Zusammenstellung bilden zwei Fachinformationsmodelle, welche sich insbesondere mit der effizienten Abwicklung von Beihilfezahlungen in der Landwirtschaft bzw. mit der effizienten Durchführung von Verfahren der Ländlichen Entwicklung beschäftigen. Nach einer kurzen Beschreibung der jeweiligen Informationsmodelle folgt in den einzelnen Abschnitten eine Darstellung der in den einzelnen Modellen gewählten Ansätze zur Berücksichtigung zeitlicher Aspekte. Jedes der Unterkapitel schließt mit einer Einordnung der Relevanz des jeweiligen Informationsmodells für die Konzeption des LandModell^{TUM}.

3.3.1 ISO 19152:2013-03 Land Administration Domain Model (LADM)

Die internationale Norm DIN EN ISO 19152:2013-03 Geoinformation - Land Administration Domain Model (LADM) beschreibt ein konzeptuelles Modell für die Administration von Land (ISO 2013). Im Fokus steht dabei insbesondere die Modellierung von Rechten, Pflichten und Einschränkungen sowie deren Bezug zu Ausschnitten der Landoberfläche bzw. einzelnen räumlichen Objekten. Die Norm versteht sich dabei nicht als Datenspezifikation sondern vielmehr als eine formale Beschreibung eines erweiterbaren Referenzmodells im Sinne einer Ontologie. Das Ziel der Norm liegt insbesondere darin, die Kommunikation über Ländergrenzen hinweg durch die Verwendung eines gemeinsamen Vokabulars zu vereinheitlichen und dadurch zu vereinfachen.

Die Norm untergliedert sich in insgesamt vier Untereinheiten, welche sich mit 1. Beteiligten, 2. Verwaltungseinheiten, Rechten, Verantwortlichkeiten und Einschränkungen, 3. räumlichen Einheiten sowie 4. Quellen der räumlichen Datenerhebung und der Modellierung von Geometrie und Topologie auseinandersetzen (ISO 2013).

3.3.1.1 Abbildung zeitlicher Aspekte im Land Administration Domain Model

Zur Repräsentation bzw. Rekonstruktion von Datenbeständen zu verschiedenen Zeitpunkten der Vergangenheit sieht DIN EN ISO 19152:2013-03 ein Versionierungskonzept für die Verwaltung und Pflege historischer Daten vor. Angaben zu zeitlichen Aspekten der Objektlebensdauer sind in der abstrakten Klasse *LA_VersionedObject* über entsprechende Attribute modelliert. Die Modellierung temporaler Eigenschaften beschränkt sich dabei jedoch ausschließlich auf die Abbildung der Lebensdauer einer Objektversion innerhalb des Datenbestandes. Angaben zur Objektlebensdauer des betreffenden Objekts in der Realwelt sind im Modell nicht vorgesehen. Die abstrakte Klasse *LA_VersionedObject* bildet die Elternklasse des Großteils der innerhalb der Norm spezifizierten Klassen und vererbt dadurch Angaben zu zeitlichen Aspekten an die jeweiligen Kindklassen.

Eine explizite Abbildung von Übergangsbeziehungen zwischen Objektversionen ist in der Norm nicht explizit vorgesehen. Transaktionen im Datenbestand mit Effekten auf Objektversionen lassen sich mit Hilfe von Spezialisierungen der abstrakten Klasse *LA_Source* - gemeint sind damit Dokumente mit rechtlichen bzw. administrativen Fakten - modellieren. Damit erlaubt das in der Norm beschriebene Modell sowohl eine ereignis- wie auch zustandsbasierte Modellierung (ISO 2013, Annex N).

3.3.1.2 Relevanz des LADM für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Das LADM beschreibt grundlegende Modellierungskonzepte für die Abbildung der Verwaltung von Land. Grundlegender Fokus liegt dabei insbesondere auf einer Strukturierung der Beziehungen zwischen Rechten, Pflichten bzw. Einschränkungen sowie deren Bezug zu einzelnen räumlichen Objekten bzw. zu Ausschnitten der Landoberfläche. Ziel der Modellierung ist damit nicht die umfassende Abbildung der Elemente der Kulturlandschaft. Daher sind die semantische Tiefe des Modells und auch die Konzepte zur Abbildung der zeitlichen Entwicklung Elementen der Kulturlandschaft für die Beantwortung der im LandModell^{TUM} behandelten Fragestellungen nicht ausreichend. Zudem handelt es sich beim LADM ausdrücklich nicht um eine Datenspezifikation sondern vielmehr um eine Empfehlung zur Modellierung vornehmlich rechtlicher Beziehungen zwischen Ausschnitten der Landoberfläche und verschiedenen Akteuren.

Annex H der Norm enthält einen Vorschlag für die Modellierung des LPIS auf Grundlage des LADM. Dabei stehen insbesondere (förder-)rechtliche Aspekte im Vordergrund. Mit der Definition unterschiedlicher Referenzparzellen gibt der Annex für die Konzeption des LandModell^{TUM} Anhaltspunkte für die semantische Untergliederung der verschiedenen Arten landwirtschaftlicher Parzellen.

3.3.2 Internationaler OGC[®]-Standard CityGML

Der internationale OGC[®]-Standard CityGML (Gröger et al. 2012) beschreibt ein Informationsmodell zur Abbildung komplex strukturierter und semantisch differenzierter 3D Stadt- und Landschaftsmodelle sowie auch ein entsprechendes XML bzw. GML-basiertes Datenformat für den Austausch entsprechender Modelle (Kolbe 2009). Konzipiert als zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell sorgt der Standard durch die Definition grundlegender thematischer Objektklassen, Attribute und Beziehungen für ein gemeinsames und damit fachdisziplinenübergreifendes Verständnis der einzelnen Komponenten, ihrer Eigenschaften und Zusammenhänge (Kolbe 2009). Wenngleich sich der Standard als 3D Stadt- und Landschaftsmodell versteht, liegt der Fokus hinsichtlich der semantischen Tiefe klar auf der Modellierung des urbanen Raums. Das semantische Modell stützt sich dabei auf Normen der ISO 191xx Familie sowie auf Standards des OGC[®] und adressiert neben der Semantik und Geometrie auch die Topologie und das Erscheinungsbild von Objekten.

Der Ausgestaltung des Standards liegen eine Reihe grundlegender Modellierungskonzepte zu Grunde. Diese umfassen nach Kolbe (2009) bzw. Gröger et al. (2012) insbesondere:

- **Modularisierung des Informationsmodells:** Der CityGML-Standard setzt sich aus einem Kernmodul und darauf aufbauenden, thematischen Modulen zusammen. Während das Kernmodul grundlegende Konzepte und Komponenten des Modells beschreibt, sind die thematischen Aspekte beispielsweise zu Gebäuden, Vegetation oder Landnutzung in separaten Modulen abgebildet.
- **Erweiterbarkeit:** CityGML versteht sich als zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell zur semantischen Repräsentation von Stadt- und Landschaftsmodellen. Die Konzeption des CityGML-Datenmodells konzentriert sich daher auf die Abbildung wesentlicher Klassen und Attribute, welche für eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen von Relevanz sind (Kolbe 2009). Für eine bedarfsgerechte Anpassung des Modells beschreibt der Standard zudem zweierlei Erweiterungskonzepte: das Konzept

der generischen Attribute bzw. generischen Objekte und das Konzept der *Application Domain Extension* (ADE). Generische Attribute erlauben die Anreicherung bestehender Objektklassen um zusätzliche Attribute. Mit Hilfe generischer Objekte lassen sich zusätzliche Objektarten im Modell abbilden. Für eine systematische und zumeist anwendungsbezogene Erweiterung des semantischen Modells hingegen sieht der Standard das sog. ADE-Konzept vor (Gröger et al. 2012; Kolbe 2009; Krüger und Kolbe 2012; Schulte und Coors 2008). Innerhalb einer ADE lassen sich sowohl zusätzliche Attribute für bestehende Objektklassen wie auch ergänzende Objektarten spezifizieren. Beispielhaft für die Anwendung dieses ADE-Mechanismus im Zusammenhang mit CityGML sind die ADE zur Abschätzung von Energiebedarfen (sog. *Energy ADE*) nach Kaden (2014), die ADE zu Abbildung von Ver- und Entsorgungsnetzwerken (sog. *Utility Network ADE*) nach Kutzner und Kolbe (2016), die im CityGML-Standard beschriebene ADE zur Berechnung der Lärmimmission (sog. *Noise ADE*) (Gröger et al. 2012, Anhang H1) oder aber die Arbeiten von Chaturvedi und Kolbe (2016) im Zusammenhang mit der Integration dynamischer Phänomene im CityGML-Modell anzuführen (sog. *Dynamizer ADE*).

- **Bildung komplexer Objekte durch Aggregation:** Über Aggregationsbeziehungen bzw. -hierarchien lassen sich in CityGML komplexe Objekte durch Gruppierung von Einzelobjekten erzeugen. Die Bildung von Objektgruppen kann zudem verschachtelt erfolgen – Objektgruppen können wiederum Bestandteil anderer Objektgruppen sein. Die Tiefe der Verschachtelung ist dabei beliebig.
- **Geometrisch-semantische Kohärenz:** Der CityGML-Standard sieht eine geometrisch-semantisch kohärente Abbildung komplexer Stadt- und Landschaftsobjekte vor (Stadler und Kolbe 2007). Die Untergliederung der einzelnen Stadt- und Landschaftsobjekte in einzelne semantische wie auch geometrische Bestandteile erfolgt dabei anhand logischer Kriterien. Geoobjekte (bzw. Aggregationen von Geoobjekten) verfügen dadurch über semantische Informationen, umgekehrt besitzen semantische Objekte Informationen zu ihrer Lage und räumlicher Ausdehnung (Kolbe 2009). Da sich die geometrisch-semantische Kohärenz insbesondere auch auf Aggregationshierarchien der beteiligten Objektklassen erstreckt, besteht im CityGML-Modell neben einer rein semantischen zudem auch eine entsprechende geometrische Hierarchie zwischen den einzelnen Objekten. In Abhängigkeit der zu beantwortenden geometrischen, thematischen oder geometrisch-thematischen Fragestellung können beide Hierarchien nach Bedarf durchlaufen werden (Gröger et al. 2012).
- **Ausbildung von Referenzen auf externe Objekte:** Die Möglichkeit zur Ausbildung von Referenzen auf externe Objekte erlaubt eine Anreicherung von CityGML-Objekten mit zusätzlichen Informationen aus externen Datenbeständen.
- **LOD-Konzept:** CityGML ermöglicht eine mehrskalige Repräsentation von Stadt- und Landschaftsobjekten in verschiedenen Generalisierungsstufen, sog. *Level of Detail* (LOD). Diese reichen in der aktuell gültigen Version 2.0 des Standards von einer 2.5 D-Repräsentation der Objektgeometrie, bis hin zu einer vollständig dreidimensionalen Abbildung von Stadt- bzw. Landschaftsobjekten mit sehr hohem geometrischen und semantischen Detaillierungsgrad. Innerhalb eines CityGML Datenbestandes kann dabei ein Objekt gleichzeitig in verschiedenen LOD-Stufen repräsentiert sein.
- **Möglichkeit zur Modellierung der Topologie von Stadt- und Landschaftsobjekten über gemeinsam genutzte Geometriekomponenten:** Neben der reinen Beschreibung der Geometrie von Objekten erlaubt CityGML auch eine Abbildung der Topologie zwischen semantischen Objekten über die gemeinsame Nutzung von Geometriekomponenten. Die topologische Nachbarschaft zweier semantischer Objekte lässt

sich dann als Verweis dieser Objekte auf die jeweils identischen Geometriebestandteile abbilden.

- **Modellierung des Erscheinungsbilds von Objekten:** CityGML-Objekte können neben geometrischen und thematischen Eigenschaften auch über Informationen zu sichtbaren Eigenschaften ihrer Oberflächen verfügen. Mit Hilfe des *Appearance*-Konzepts lassen sich Objekte photorealistisch oder thematisch klassifizierte bzw. entsprechend der jeweiligen Materialeigenschaften darstellen.
- **Möglichkeit zur Abbildung von impliziter Geometrie:** Neben der expliziten Modellierung der Geometrie von Geoobjekten mit Hilfe von absoluten Koordinaten der Realwelt erlaubt CityGML zudem die implizite Abbildung der Geometrie von Stadt- und Landschaftsobjekten. Diese Art der Modellierung von Geoobjekten kann insbesondere dann angebracht sein, wenn gleichgeformte Elemente eines Stadtmodells (beispielsweise Bäume) mehrfach innerhalb eines Datenbestandes vorkommen. Entsprechende CityGML-Objekte können in diesem Fall auf prototypisch und innerhalb eines lokalen Koordinatensystems modellierte Geometrieobjekte verweisen. Mit Hilfe eines Referenzpunktes und einer Transformationsmatrix mit Parametern zur Translation, Rotation und Skalierung lässt sich aus der prototypischen Vorlage eines Geoobjekts die Geometrie des Stadt- bzw. Landschaftsobjekts in Form von Realweltkoordinaten erzeugen.
- **CityGML als Informationsmodell und XML-basiertes Austauschformat:** Neben dem semantischen Datenmodell zur Strukturierung komplexer Stadt- und Landschaftsmodelle beschreibt der CityGML-Standard auch ein XML bzw. GML-basiertes Transferformat zum Austausch entsprechend strukturierter Modelle. Dies vereinfacht insbesondere den Informationsfluss zwischen unterschiedlichen Akteuren.

Zusätzlich zu diesen Aspekten hat sich im Kontext von CityGML auch die Kopplung des Informationsmodells mit komplexen Analyse- und Simulationswerkzeugen als erfolgreiches Konzept etabliert. Beispielhaft seien in diesem Zusammenhang die Energiebedarfsabschätzung von Gebäuden nach Kaden (2014), die Solarpotentialanalyse nach Chaturvedi et al. (2017), die Verkehrssimulation nach Ruhdorfer (2017), die Detonationssimulation nach Willenborg (2015) oder aber die fehlertolerante Volumenapproximation von Gebäuden nach Steuer et al. (2015) bzw. Sindram et al. (2016) angeführt, welche auf Grundlage von CityGML Stadt- und Landschaftsmodellen durchgeführt werden. Durch semantische Anreicherung der betreffenden Objekte ist es möglich, die Ergebnisse verschiedenster komplexer Analyse- bzw. Simulationswerkzeuge auf Ebene der jeweils zugehörigen Objekte zu speichern und diese Information für weiterführende Analysen bereitzustellen.

Die gewonnenen Informationen stehen dadurch jeweils in Beziehung zu den betreffenden semantischen Objekten des Stadt- und Landschaftsmodells. Das Konzept der semantischen Anreicherung von Objekten lässt sich darüber hinaus beispielsweise auch auf Sensordaten übertragen (vgl. Arbeiten von Chaturvedi und Kolbe 2016). Als interdisziplinäre Integrationsplattform wird der internationale Standard CityGML bereits erfolgreich für den Aufbau einer Dateninfrastruktur für intelligente Städte (*Smart Districts Data Infrastructure* (SDDI)) eingesetzt (vgl. Moshrefzadeh et al. 2017).

3.3.2.1 Abbildung zeitlicher Aspekte in CityGML

In der derzeit gültigen Version 2.0 des CityGML-Standards (Gröger et al. 2012) erfolgt die Abbildung zeitlicher Aspekte im *Core*-Modul über Attribute der abstrakten Basisklasse *_CityObject*, welche die Grundlage für alle thematischen CityGML-Objektklassen bildet und damit ihre Eigenschaften an diese vererbt. So verfügt die abstrakte Klasse *_CityObject* über die Attribute *creationDate* und *terminationDate*, wodurch sich Angaben zu Transaktionszeitpunkten innerhalb eines Datenbestandes – also zum Zeitpunkt der Entstehung bzw. des Untergangs eines Objekts – modellieren lassen. Zusätzlich können die aus den abstrakten Klassen *_AbstractBuilding*, *_AbstractTunnel* und *_AbstractBridge* abgeleiteten Klassen Angaben zu Baujahr und Jahr des Abbruchs entsprechender Objekte mit Bezug zur Realwelt enthalten. Damit verfolgt CityGML in der Version 2.0 den Grundgedanken einer bitemporalen Abbildung des Aspekts Zeit, wenngleich diese Art der Abbildung nicht vollständig für alle im Standard enthaltenen Objektarten umgesetzt ist. Zur Integration der Zeit als zusätzliche Dimension von CityGML-Modellen wurden verschiedene Konzepte entwickelt so beispielsweise von Fan (2010), Pfeiffer et al. (2013), Morel und Gesquière (2014) oder Chaturvedi et al. (2015).

Zur Versionierung von CityGML-Modellen sowie den darin enthaltenen thematischen Objektklassen wurde von Chaturvedi et al. (2015) ein umfassendes Lösungskonzept zur Integration der Dimension Zeit in CityGML vorgeschlagen. Neben einer rein chronologischen Historisierung im Sinne der Abbildung von Objektzuständen bzw. -versionen der Vergangenheit erlaubt der beschriebene Ansatz auch die Repräsentation alternativer Versionen (= Szenarien) der Zukunft wie auch der Vergangenheit. Mögliche Anwendungsfelder dieses Verzweigungsansatzes (sog. *branching*) könnten beispielsweise in der Archäologie (Szenarien der Vergangenheit) oder aber in der Planung (Szenarien der Zukunft) liegen. Der Ansatz führt zusätzliche Objektklassen und Datentypen zur Abbildung von Objektversionen sowie zur Modellierung der Übergänge zwischen Objektversionen ein. So verfügt der ergänzte abstrakte *FeatureType VersionableAbstractFeature* mit den transaktionszeitbezogenen Attributen *creationDate* und *terminationDate* und den realweltbezogenen Attributen *validFrom* und *validTo* über Attribute der bitemporalen Datenhaltung. Dieser abstrakte *FeatureType VersionableAbstractFeature* bildet die Basisklasse für die CityGML-Klassen *CityModel* sowie für die abstrakten Klassen *AbstractAppearance*, *AbstractCityObject* sowie den neu eingefügten *FeatureType Version* und vererbt diese Attribute entsprechend an die abgeleiteten Klassen. Die Beziehung zwischen Versionen sowie auch Angaben zu Art und Ursachen eines Versionsübergangs lassen sich über den *FeatureType VersionTransition* bzw. mit Hilfe der darin abgebildeten Attribute explizit im Datenmodell abbilden. Übergänge zwischen Versionen lassen sich als Summe einzelner Transaktionen abbilden. Die Abbildung von Versionsübergängen ist insbesondere auch für die konsistente Zusammenführung verschiedener zeitlich parallel verlaufender Versionen von herausragender Bedeutung.

Die Implementierung des Versionierungsansatzes erfolgt in Anlehnung an das im Kontext der AAA[®]- bzw. INSPIRE-Modellierung gewählte Vorgehen: Die einzelnen CityGML-Objekte erhalten einen stabilen Objektidentifikator (sog. *majorID*), welcher über die gesamte Lebensdauer eines Objekts bestehen bleibt. Dieser Hauptidentifikator wird zur eindeutigen Kennzeichnung von Objektversionen durch einen Nebenidentifikator (sog. *minorID* bzw. *subID*) ergänzt.

Für die Repräsentation hoch dynamischer und zeitabhängiger Phänomene der Realwelt entwickeln Chaturvedi und Kolbe (2015) das sog. *Dynamizer*-Konzept als Erweiterung von CityGML-Modellen, welches schließlich in eine umfassende CityGML-ADE mündet (Chatur-

vedi und Kolbe 2016). Im beschriebenen Konzept verweisen sog. *Dynamizer-Objekte* auf spezifische Attribute bestimmter Objekte des 3D-Stadtmodells und stellen dafür zeitabhängige Werte bereit, welche dann die statischen Werte des jeweils referenzierten Attributs überschreiben. Zeitabhängige Attributwerte lassen sich dabei in Form von tabellarischen Zeitreihen, Verweisen auf Sensorbeobachtungsdienste (sog. *Sensor Observation Service* (SOS)) oder aber durch (sich wiederholende) Zeitreihenmuster abbilden. Das Konzept konnte bereits im Zusammenhang mit der Abbildung von Simulationsergebnissen zur solaren Einstrahlung auf Bestandteile virtueller 3D Stadt- und Landschaftsmodelle erfolgreich implementiert werden (Chaturvedi et al. 2017).

In der künftigen Version 3.0 des CityGML-Standards sollen umfassendere Konzepte der zeitlichen Dynamik im Modell berücksichtigt werden (Kutzner et al. 2020).

3.3.2.2 Relevanz von CityGML für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Der internationale OGC[®]-Standard CityGML repräsentiert ein zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell für die Abbildung von 3D Stadt- und Landschaftsmodellen mit Fokus auf dem urbanen Raum. Im semantischen Modell ist die Abbildung der Landnutzung zwar vorgesehen, die semantische Tiefe der Modellierung ist jedoch für die Beantwortung der Fragestellungen im Kontext des LandModell^{TUM} nicht ausreichend. Ähnliches gilt auch hinsichtlich der Abbildung zeitlicher Aspekte in der aktuell gültigen Version 2.0 des Standards. Parallel zu den Arbeiten am LandModell^{TUM} entwickelt Chaturvedi et al. (2015) am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München Konzepte zur umfassenderen Integration der Dimension Zeit in CityGML.

Für die Konzeption eines umfassenden und zunächst anwendungsneutralen Informationsmodells der Kulturlandschaft beschreibt der Standard eine Vielzahl nützlicher Konzepte und liefert damit eine gute Vorlage für die Konzeption des LandModell^{TUM}. Zu diesen Konzepten zählen insbesondere die modulare Untergliederung des Modells in ein Kernpaket und darauf zurückgreifende thematische Pakete, die bereits im semantischen Modell berücksichtigte Erweiterbarkeit – einschließlich dem Konzept der semantischen Anreicherung –, die kohärente Modellierung von Geometrie und Semantik, das Konzept der Ausbildung von Verweisen auf externe Datenbestände sowie die Erzeugung komplexer Objekte durch Aggregation räumlich-semantischer Untereinheiten.

3.3.3 INSPIRE-Richtlinie

Ziel der Richtlinie INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) ist der Aufbau einer europäischen GDI zur Erschließung umweltrelevanter Geodaten für Anwendungen innerhalb des Themenkomplexes Umweltpolitik der *Europäischen Union* (EU). Die GDI soll dabei auf den bereits bestehenden GDI-Lösungen der einzelnen Mitgliedsstaaten aufsetzen und einen harmonisierten und interoperablen Zugriff auf die Geodaten ermöglichen. Rechtliche Grundlage bildet die Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.

Die INSPIRE-Richtlinie adressiert insbesondere fünf grundlegende Komponenten der GDI: 1. Metadaten 2. Interoperabilität von Geodatenätzen und -diensten 3. Netzdienste (Such-, Darstellungs-, Download- und Transformationsdienste sowie Dienste für den Abruf von Geo-

datendiensten) 4. Vereinbarungen über die gemeinsame Nutzung 5. Koordinierungs- und Überwachungsmechanismen

Für die Gewährleistung der Interoperabilität werden in den INSPIRE-Durchführungsbestimmungen bzw. in den technischen Leitlinien gemeinsame Informationsmodelle bzw. Datenspezifikationen festgelegt. Diese Informationsmodelle stützen sich auf Normen der ISO 191xx Familie und greifen für die Ausgestaltung der Datenspezifikationen auf die Modellierungssprache UML zurück. Die insgesamt 34 im Anhang der INSPIRE-Richtlinie genannten Geodaten Themen werden jeweils in einer Datenspezifikation beschrieben.

3.3.3.1 Abbildung der Dimension Zeit in INSPIRE

Das *Generic Conceptual Model für INSPIRE* (INSPIRE 2014) beschreibt zahlreiche Anforderungen und Empfehlungen für die optionale Modellierung des Lebenszyklus von Geoobjekten in der Realwelt sowie auch innerhalb von Datenbeständen. Für die Abbildung zeitlicher Aspekte wird ein bitemporaler Ansatz vorgeschlagen, wodurch sich sowohl Angaben zur Lebensdauer in der Realwelt als auch im Datenbestand abbilden lassen. Zur Unterscheidung zwischen thematischen und zeitbezogenen Eigenschaften von Geoobjekten wird der Stereotyp «lifeCycleInfo» eingeführt. Als Bestandteil der externen Objektidentifikatoren sind in der Spezifikation zudem Versionsidentifikatoren vorgesehen, wodurch mehrere Versionen eines Objekts eindeutig voneinander zu unterscheiden sind.

Das *Generic Conceptual Model für INSPIRE* fokussiert sich jedoch insbesondere auf die Abbildung des jeweils aktuell gültigen Zustands von Geoobjekten bzw. des letzten gültigen Zustand bereits untergegangener Objekte. Die konsistente Verwaltung und Bereitstellung verschiedener historischer Versionen von Geoobjekten ist dabei nicht umfänglich spezifiziert (INSPIRE 2014, S. 60). Im *Generic Conceptual Model für INSPIRE* ist grundsätzlich keine Abbildung der zeitlich-topologischen Beziehung zwischen Geoobjekten und auch keine Modellierung von Übergangsbeziehungen vorgesehen.

Lediglich die Datenspezifikation für statistischer Einheiten (INSPIRE Thematic Working Group Statistical Units 2013) beschreibt neben einer reinen Abbildung von Objektzuständen zu verschiedenen Zeitpunkten zusätzlich Konzepte für die explizite Modellierung der Evolution von Objekten bzw. Objektversionen. Übergänge zwischen Objektversionen sind in einer eigenen Objektklasse *Evolution* modelliert, welche eine Abstammungsbeziehung zwischen den einzelnen Versionen herstellt. Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen sind dabei über Rollennamen artikuliert. Neben dem Zeitpunkt, zu welchem ein Übergang zwischen Objektversionen erfolgt, enthält die Klasse zudem Attribute zur Beschreibung der Art einer Veränderung sowie weitere Attribute von Relevanz für die Abbildung statistischer Einheiten vom Stereotyp «voidable».

Hinsichtlich der möglichen Evolutionstypen unterscheidet die Spezifikation in Erzeugung, Untergang und Veränderung eines Objekts, wobei mit letzterer sowohl geometrische wie auch thematische Aspekte adressiert sind. Bei flächenhaften Objekten kann eine geometrische Veränderung zudem sowohl in Form einer *Aggregation* bzw. *Verschmelzung* als auch über eine *Teilung* erfolgen. Die Veränderungstypen *Entstehung*, *Untergang*, *Umformung*, *Teilung* und *Zusammenlegung* sind in einer *CodeList* spezifiziert. Für einzelne Arten der Weiterentwicklung von Objekten legt die Spezifikation zudem Randbedingungen fest.

Der in der Spezifikation beschriebene Ansatz zur Abbildung der Objektevolution geht von der Annahme aus, dass die Evolution von Geoobjekten jeweils lediglich über eine der genannten Veränderungstypen stattfinden kann. So können Geoobjekte beispielsweise ausschließlich vollständig mit anderen Geoobjekten zu neuen Geoobjekten verschmolzen werden. Mischformen unterschiedlicher geometrischer Veränderungen sind ebensowenig darstellbar wie eine Reallokation geometrischer Teilbereiche von Geoobjekten.

3.3.3.2 Relevanz der INSPIRE-Richtlinie für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Die Datenspezifikationen der INSPIRE-Richtlinie behandeln zahlreiche Themen, die auch Relevanz für den Aufbau des LandModell^{TUM} als Modell der Kulturlandschaft besitzen. Beispielhaft seien die Themen Landwirtschaft und Aquakultur, Transportnetzwerke, Landnutzung, Boden oder aber administrative bzw. statistische Einheiten herausgegriffen. Die semantische Modellierung der in diesen Spezifikationen beschriebenen Themen könnte als Grundlage für die semantische Untergliederung der Kulturlandschaft dienen und damit für die Konzeption des LandModell^{TUM} von Relevanz sein.

Der Fokus der Konzeption der GDI liegt hauptsächlich auf der Erschließung von Umweltinformationen und nicht oder nur sehr bedingt auf dem raumzeitlichen Monitoring der Kulturlandschaft. Die semantische Differenzierung der verschiedenen Aspekte ist jedoch für die im LandModell^{TUM} zu bearbeitenden Fragestellungen nicht ausreichend.

Zeitliche Aspekte sind nur sehr bedingt Bestandteil der Spezifikationen von INSPIRE. Die Abbildung zeitlicher Aspekte ist auch nicht verpflichtend. Vielmehr liegt der Fokus der GDI auf der Erschließung aktueller bzw. jeweils gültiger Information.

3.3.4 AAA[®]-Modellierung

Das AAA[®]-Modell (AdV 2009) ist ein semantisches Modell, das zur deutschlandweit einheitlichen Strukturierung der Daten des *Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems* (ATKIS[®]), des *Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems* (ALKIS[®]) sowie des *Amtlichen Festpunktinformationssystems* (AFIS[®]) dient. Dabei beschreibt das AAA[®]-Modell bzw. dessen Komponenten eine Vielzahl von Objektarten zur semantischen Strukturierung und Beschreibung unterschiedlichster Elemente der Kulturlandschaft. Die Bandbreite des Modells reicht dabei von Informationen des Liegenschaftskatasters, über die TN, die Bodenschätzung und Gebäudeinformation bis zum Digitalen Landschaftsmodell.

Das AAA[®]-Vorhaben wird von der *Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland* (AdV) vorangetrieben. Die Modellierung erfolgt auf Basis der ISO 191xx Normenfamilie und unter Verwendung der Modellierungssprache UML.

3.3.4.1 Abbildung zeitlicher Aspekte im AAA[®]-Vorhaben

Zur Abbildung historischer Zustände des Datenbestandes sieht das AAA[®]-Modell ein Versionierungskonzept vor (AdV 2009). Die Abbildung von Objektlebensdauern ist bereits im AAA[®]-Basisschema verankert. Daneben sind in einem eigenen AAA[®]-Versionierungsschema Konzepte zur Modellierung bzw. Historisierung fortführungsbeding-

ter, temporaler Veränderungen von Fachobjekten abgebildet (AdV 2009). Historisierte und jeweils aktuell gültige Instanzen einzelner Objektversionen werden in sogenannten Objektbehältern vorgehalten und verfügen neben Attributen und Assoziationen insbesondere über Angaben zum jeweiligen Lebenszeitintervall.

Im Hinblick auf die Versionierung werden für die Fachobjekte stabile Identifikatoren eingeführt. Bei fortführungsbedingten Änderungen im Datenbestand ist zwischen *objektbildenden* und *nicht objektbildenden* Eigenschaftsveränderungen zu unterscheiden. Angaben zu objektbildenden bzw. nicht objektbildenden Eigenschaften der jeweiligen Objektarten sind dem semantischen Modell zu entnehmen (AdV 2009, S. 57 ff.). Kommt es bei der Fortführung eines Datenbestandes zur Veränderung einer nicht objektbildenden Eigenschaft eines Objekts, so wird eine neue Objektversion angelegt. Mit dem Beginn des Lebenszeitintervalls einer neuen Version endet gleichzeitig die Lebensdauer der Vorgängerversion eines Objekts. Veraltete Versionen eines Objekts bleiben historisiert bestehen. Das eigentliche Objekt wie auch der zugehörige Objektidentifikator bestehen fort.

Kommt es im Gegensatz dazu bei der Fortführung eines Datenbestandes zur Veränderung einer objektbildenden Eigenschaft so führt eine derartige Modifikation zum Untergang des betreffenden Objekts. Das Objekt wie auch dessen Versionen bleiben historisiert im Datenbestand erhalten.

Zu Gunsten eines performanten Datenzugriffs sind Attribute über mehrere Versionen eines Objekts hinweg redundant abgebildet. Veränderungen zwischen Versionen eines Objekts sowie auch objektübergreifende Veränderungen sind nicht explizit abgebildet und lassen sich daher nur durch den Vergleich von Objekten bzw. Versionen erkennen und analysieren.

3.3.4.2 Relevanz des AAA[®]-Vorhabens für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Das AAA[®]-Modell beschreibt eine Vielzahl von Objektarten mit unmittelbarer Relevanz für das LandModell^{TUM}. Beispielhaft sei der Themenbereich Verkehrswege des ATKIS[®]-Basis-DLM (Basis-Digitales Landschaftsmodell) oder aber die *Tatsächliche Nutzung* (TN) der Erdoberfläche als Bestandteil des ALKIS[®] mit ihren vier Objektartengruppen Vegetation, Verkehr, Siedlung und Gewässer herausgegriffen.

Das AAA[®]-Modell sieht insbesondere vor dem Hintergrund der *Nutzerbezogene Bestandsdatenaktualisierung* (NBA) ein Historisierungs- bzw. Versionierungskonzept vor. Die Versionierung erfolgt dabei auf Objektebene, weshalb auch unveränderte Eigenschaften Bestandteil einer Objektversion sind und damit redundant abgebildet sind. Eine wichtige Rolle in diesem Zusammenhang spielen zeitlich stabile Objektidentifikatoren, welche stellvertretend für das repräsentierte Objekt stehen. Für die Verknüpfung von Information mit den betreffenden Objekten stehen damit Identifikatoren zur Verfügung, die im Falle nicht objektbildender Veränderungen von Objekten stabil bleiben.

Das Modell sieht keine explizite Abbildung zeitlich-topologischer Beziehungen zwischen Objekten bzw. Objektversionen vor. Veränderungen einzelner Objekte sind damit lediglich implizit abgebildet und nur durch Vergleich der betreffenden Objekte bzw. Objektversionen für Analysen zugänglich.

3.3.5 Landentwicklungsfachinformationssystem (LEFIS)

Ziel des *Landentwicklungsfachinformationssystem* (LEFIS) ist die Bereitstellung eines länderübergreifenden Fachinformationssystems für Belange der Landentwicklung. Der Aufbau eines entsprechenden Fachinformationssystems geht auf einen Beschluss der *Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung* (ArgeLandentwicklung) auf Anregung des Arbeitskreises „Technik und Automation“ im Jahr 2000 zurück (Fehres 2007). Mit der Einführung eines entsprechenden Systems sollen Bodenordnungsverfahren nach FlurbG und *Landwirtschaftsanpassungsgesetz* (LwAnpG) erheblich vereinfacht und damit auch effizienter gestaltet werden (Fehres 2007). Das objektorientierte LEFIS-Datenmodell setzt auf dem AAA[®] Modell der AdV auf und erweitert dieses um verschiedene Aspekte der Flurneuordnung. Die Modellierung erfolgt dabei unter Verwendung von UML sowie unter Berücksichtigung internationaler Normen und Standards. Die enge Verzahnung des LEFIS mit dem AAA[®]-Modell ermöglicht eine Verwendung der im Kontext der AAA[®]-Modellierung entwickelten *Normbasierten Austauschschnittstelle* (NAS), wodurch der erforderliche Datenaustausch mit den Vermessungsverwaltungen und die durchgängige Bearbeitung von Flurneuordnungsverfahren erheblich vereinfacht wird.

3.3.5.1 Abbildung zeitlicher Aspekte im LEFIS

Das LEFIS-Datenmodell beinhaltet kein eigenständiges Historisierungskonzept und greift daher auf das Versionierungskonzept des AAA[®]-Modells zurück.

3.3.5.2 Relevanz des LEFIS für für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Als Fachinformationssystem bzw. als fachliche Erweiterung des ALKIS[®] konzentriert sich das LEFIS insbesondere auf rechtliche und verfahrenstechnische Aspekte bei der Durchführung von Bodenordnungsverfahren. Eine umfassende raumzeitliche Abbildung der Kulturlandschaft ist nicht Gegenstand des Modells. Für die Bearbeitung der im LandModell^{TUM} gestellten Forschungsfragen besitzt das LEFIS zunächst keine unmittelbare Relevanz hinsichtlich der Konzeption des LandModell^{TUM}.

3.3.6 Land Parcel Identification System (LPIS)

Neben Informationssystemen zur eindeutigen Identifikation landwirtschaftlicher Betriebe, zur EU-weiten Kennzeichnung von Nutztieren sowie zur Verwaltung und Kontrolle von Beihilfeanträgen und -zahlungsansprüchen in der Landwirtschaft stellt das LPIS zur eindeutigen Identifizierung und Verortung landwirtschaftlicher Parzellen eine wesentliche Komponente des *Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems* (InVeKoS) zur effizienten Verwaltung und Kontrolle von Fördermaßnahmen im Rahmen der *Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union* (GAP) dar. Bereits mit der Einführung des InVeKoS (Verordnung (EWG) Nr. 3508/1992) ist ein System zur eindeutigen Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen vorgesehen. Die Identifikation erfolgt zunächst über ein alphanumerisches System mit Bezug auf Katasterpläne, sonstiges Kartenmaterial oder Luftbild- bzw. Satellitenaufnahmen. Aufgrund von Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Verwaltung und Kontrolle angemeldeter landwirtschaftlicher Parzellen wird in der Verordnung (EG) Nr. 1593/2000 die Ver-

wendung „computergestützte[r] geographische[r] Informationssystemtechniken“ zur Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen auf Basis von Katasterdaten sowie weiterer Geodaten spätestens bis zum Jahr 2005 festgelegt. Geoinformation und entsprechende Informationssysteme bilden seither eine wesentliche Grundlage für die Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen im Rahmen des InVeKoS (vgl. Verordnung (EG) Nr. 1782/2003, Verordnung (EG) Nr. 73/2009, Verordnung (EU) Nr. 1306/2013, Verordnung (EU) Nr. 1307/2013 und Delegierten Verordnung (EU) Nr. 640/2014).

Konzeption und Aufbau entsprechender LPIS erfolgen dezentral in den Mitgliedsstaaten der EU. So existieren in den 28 Mitgliedsstaaten 44 (Stand 2016) nationale bzw. regionale LPIS (Europäischer Rechnungshof 2016). Aufgrund der in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU sowie teils auch innerhalb einzelner Länder regional unterschiedlichen Umsetzung eines LPIS liegen den jeweiligen Systemen der einzelnen Länder zumeist unterschiedliche Informationsmodelle zugrunde (Inan et al. 2010; Sagris 2013). Zur Harmonisierung der heterogenen Systeme und Informationsmodelle gibt es insbesondere ausgehend vom *Joint Research Centre der Europäischen Kommission* (JRC) Bestrebungen, die verschiedenartigen, nationalen Umsetzungen über gemeinsame Informationsmodelle zusammenzuführen. In diesem Zusammenhang entsteht beispielsweise das auf Normen der ISO 191xx Normenfamilie aufbauende *LPIS Core Conceptual Model* (LCM) (Sagris 2009, 2013; Sagris und Devos 2008, 2009; Sagris et al. 2013) oder aber eine Erweiterung der internationalen Norm ISO 19152:2013-03 - LADM (Inan et al. 2010; ISO 2013, Annex H).

Im Fokus der Harmonisierungsbestrebungen stehen insbesondere die Konzeption eines gemeinsamen Frameworks zur einheitlichen Qualitäts- und Konsistenzsicherung, zur Prüfung der Konformität zu rechtlichen Vorgaben der GAP, die Interoperabilität zwischen den unterschiedlichen Systemen sowie auch die Schaffung einer einheitlichen Grundlage für den Aufbau entsprechender Geodateninfrastrukturen beispielsweise im Zusammenhang mit INSPIRE (Sagris 2013). Die Modellierung eines LCM konzentriert sich insbesondere auf die Abbildung förderungsrelevanter Aspekte hinsichtlich der GAP - eine umfassende Abbildung der Kulturlandschaft vor dem Hintergrund wissenschaftlicher Fragestellungen hinsichtlich der Interaktion der einzelnen Komponenten ist nicht Gegenstand der Modellierung.

3.3.6.1 Abbildung der Dimension Zeit innerhalb des LPIS

Nicht zuletzt aufgrund der jährlichen Beantragung von Förderungsmaßnahmen im Zuge der GAP unterliegen die Daten des InVeKoS bzw. LPIS einer stetigen Fortführung sowie einer fortlaufenden Kontrolle und Anpassung. Neben einer ausschließlichen Abbildung der Lebensdauer von Phänomenen und Objekten in der Realwelt sowie auch innerhalb von Datenbeständen ist daher auch die Modellierung von Zeitangaben beispielsweise hinsichtlich der Beantragung, Administration und Kontrolle von Bedeutung.

Da den InVeKoS bzw. LPIS innerhalb der EU-Mitgliedsstaaten national wie auch regional unterschiedliche Konzepte und Implementierungen zugrundeliegen, bestehen auch Unterschiede hinsichtlich der Abbildung zeitlicher Aspekte in den einzelnen Systemen der jeweiligen Länder. Wie eine Untersuchung von Sagris und Devos (2008) am Beispiel der Modellierung landwirtschaftlicher Bezugsparzellen in den LPIS der EU-Mitgliedsstaaten zeigt, verfügen Objekte von diesem Typ sowohl über Angaben zu Zeitpunkten mit Bezug auf Vorgänge in der Realwelt wie auch über Eigenschaften mit Relevanz für das Management der einzelnen Objekte innerhalb der jeweiligen Datenbestände. Als Beispiele für zeitliche Angaben zu hauptsächlich förderungsrelevanten Vorgängen der Realwelt sind beispielsweise

Attribute zur Beschreibung des Inkrafttretens einer Objektversion, zum Zeitpunkt der Antragstellung sowie auch zum Zeitpunkt der Veränderung von Eigenschaften einer Parzelle anzuführen. Für das Management der Daten sind in den nationalen/föderalen Implementierungen der LPIS zudem auch Eigenschaften zur Abbildung der Historie eines Objekts innerhalb des jeweiligen Datenbestandes (Erstellung bzw. Untergang eines Objekts bzw. einer Objektversion) berücksichtigt. In einzelnen nationalen bzw. föderalen Umsetzungen eines LPIS verfügen landwirtschaftliche Parzellen darüber hinaus auch über Angaben zu vorhergehenden Objektversionen.

3.3.6.2 Relevanz von LPIS für die Konzeption des LandModell^{TUM}

Die Informationssysteme zur Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen als Bestandteil des InVeKoS liefern eine detaillierte Beschreibung der landwirtschaftlichen Flächennutzung einschließlich der Entwicklung über die Zeit. Dabei liegen den Implementierungen in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU uneinheitliche Informationsmodelle zugrunde, deren Fokus insbesondere auf der Administration, Dokumentation und Kontrolle von Beihilfezahlungen im Kontext der GAP der EU liegt. Dennoch liefern die Informationsmodelle gute Anhaltspunkte zur semantischen Untergliederung der Agrarlandschaft – insbesondere der landwirtschaftlichen Flächennutzung. So ist zur Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen spätestens mit der Verordnung (EG) Nr. 795/2004 die Abbildung sogenannter Referenzparzellen vorgesehen. Nach der Delegierten Verordnung (EU) Nr. 640/2014 umfassen Referenzparzellen diejenigen Flächeneinheiten, welche für Acker-, Dauergrünland-, Weideland, für Dauerkulturen (gemäß Verordnung (EU) Nr. 1307/2013) oder Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (gemäß Verordnung (EU) Nr. 1305/2013) genutzt werden. Vorschläge zur semantischen Untergliederung landwirtschaftlicher Parzellen finden sich zudem auch im Annex H des LADM (DIN EN ISO 19152:2013-03).

Die Sicht der Informationssysteme zur Identifikation landwirtschaftlicher Parzellen beschränkt sich allerdings ausschließlich auf die landwirtschaftliche Flächennutzung. Andere Komponenten der Kulturlandschaft bleiben weitestgehend unbeachtet. In den verschiedenen Informationssystemen ist die Abbildung der Dimension Zeit vielfach über einen einfachen Historisierungsansatz vorgesehen, dessen Art der Umsetzung nicht zentral vorgegeben ist. Aufgrund der bedarfsgerechten Ausgestaltung der Informationssysteme für eine effiziente Verwaltung und Kontrolle förderrelevanter Daten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung sind die Informationssysteme nicht oder nur sehr eingeschränkt für ein umfassendes raumzeitliches Monitoring der Kulturlandschaft und ihrer Entwicklung über die Zeit geeignet.

Für die Realisierung des LandModell^{TUM} liefern die Informationssysteme eine umfangreiche und flächendeckend verfügbare Datengrundlage zur Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen sowie auch detaillierte Angaben zu landwirtschaftlichen Kulturen und durchgeführten Agrarumweltmaßnahmen. Darüber hinaus können dem InVeKoS Angaben zu den jeweils bewirtschaftenden Betrieben entnommen werden.

3.3.7 Bestrebungen des Open Geospatial Consortium zur Verbesserung der Interoperabilität von Information in der Landwirtschaft

Seit Ende 2014 bestehen seitens des OGC[®] auch für den Bereich Landwirtschaft Bestrebungen, die Interoperabilität hinsichtlich des Datenaustauschs und der Datenbereit-

stellung zu verbessern bzw. zu vereinfachen. Entsprechend wurde im Oktober 2014 eine *Domain Working Group* (DWG) für die Landwirtschaft eingerichtet (sog. *Agriculture-DWG*). Ziel dieser DWG ist die Definition und Dokumentation von Interoperabilitätsanforderungen der verschiedenen Nutzergruppen aus dem Bereich der Landwirtschaft. Diese Anforderungen sollen perspektivisch in die bestehenden Standardisierungsbestrebungen des OGC[®] einfließen. Andererseits bestehen auch Bestrebungen, die bereits bestehenden OGC[®]-Standards verstärkt in den Anwendungsbereichen der Landwirtschaft zu verankern.

Als wichtige Voraussetzung für die Verbesserung der Interoperabilität führt Charvat (2019) neben einer Harmonisierung von Informationsmodellen auch Aspekte wie Linked Data oder Festlegung von Datenaustauschformaten, standardisierte Zugriff auf Daten beispielsweise über *Web Feature Services* (WFS), die Verwendung einschlägiger Standards aus dem Bereich *Internet of Things* (IoT) oder aber eine umfassende Abbildung von Metadaten an. Zum aktuellen Zeitpunkt liegt noch kein Entwurf der Agriculture DWG eines harmonisierten Informationsmodell für die Landwirtschaft vor.

3.4 Zwischenfazit

Wie die Zusammenstellung von Modellen in diesem Abschnitt verdeutlicht, existiert bereits eine gewisse Vielfalt an Informationsmodellen zur Abbildung der Kulturlandschaft bzw. ihrer Komponenten. Die Bandbreite reicht dabei von internationalen Normen und Standards bis hin zu europäischen und nationalen Harmonisierungsbestrebungen. Daneben haben sich in verschiedenen Bereichen auch bereits Fachinformationsmodelle etabliert, die sich mit unterschiedlichen thematischen Aspekten der Kulturlandschaft auseinandersetzen. Der Fokus aller hier vorgestellten Informationsmodelle liegt insbesondere auf der topographischen Abbildung und Beschreibung der Kulturlandschaft und - mit Ausnahme des CityGML-Standards - nicht auf einer Nutzung des Informationsmodells als Plattform zur Verknüpfung von Information verschiedener Fachdisziplinen. Als einziges der in diesem Kapitel beschriebenen Informationsmodelle versteht sich CityGML als zunächst anwendungsneutrales und erweiterbares Modell, welches sich zur Fusion interdisziplinärer Information einsetzen lässt. Einige Konzepte des Standards könnten sich daher für die Konzeption des LandModell^{TUM} als hilfreich erweisen. Hierzu zählen beispielsweise insbesondere das Konzept der modularen Untergliederung in Kern- und hierauf basierende, thematische Pakete, die Erweiterbarkeit um zusätzliche Objektarten und -attribute, die geometrisch-semantische Kohärenz der Abbildung von Objekten, die Modellierung komplexer Objekte durch Aggregation von Einzelbestandteilen sowie insbesondere auch die Kopplung des Informationsmodells mit komplexen Analysemethoden einschließlich der semantischen Anreicherung der betreffenden Objekte um die Ergebnisse der durchgeführten Analysen.

Sofern in den beschriebenen Datenmodellen überhaupt eine Berücksichtigung der Zeit vorgesehen ist, beschränkt sich die Abbildung zumeist auf Objektlebensdauern. Die Historisierung im AAA[®]-Modell sieht eine vollständige Speicherung von Objektversionen einschließlich sämtlicher Attribute vor. Verschiedene Versionen eines Objekts lassen sich sowohl im AAA[®]-Modell, in den INSPIRE-Richtlinien sowie auch in der vorgestellten CityGML-ADE über stabile Identifikatoren des Objekts selbst referenzieren. In den bestehenden Versionierungsansätzen sind Zustandsveränderungen einzelner Attribute lediglich über den Vergleich von Attributen verschiedener Versionen des selben Objekts zugänglich.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Informationsmodelle verfügen über keine semantisch-geometrisch kleinteilige Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten. Ansätze in diese Richtung finden sich in einzelnen Spezifikationen der INSPIRE-Richtlinie oder aber auch in der vorgestellten CityGML ADE. Damit fehlt bislang ein umfassendes Informationsmodell der Kulturlandschaft, welches die Dimension Zeit – d.h. sowohl hinsichtlich der Lebensdauer, der Zustandsveränderungen auf Attributebene als auch hinsichtlich der zeitlichen Übergänge zwischen Objekten bzw. der Reallokation geometrischer Objektbestandteile – umfänglich abbildet und auf einfache Weise weiterführenden Analysen zugänglich macht.

Hinsichtlich der semantischen Differenzierung von Komponenten der Kulturlandschaft und ihrer Eigenschaften liefern die bestehenden Informationsmodelle hilfreiche Erkenntnisse. Dazu sind insbesondere die Untergliederung der Objektarten innerhalb der TN, der digitalen Flurkarte und des ATKIS[®] (jeweils Bestandteil des AAA[®]-Modells) sowie auch die semantische Untergliederung landwirtschaftlicher Parzellen der LPIS von Relevanz.

4 Semantisches LandModell^{TUM}

Das raumzeitliche Informationsmodell bildet als formal beschriebene und maschineninterpretierbare Grundlage den Kern des in dieser Arbeit beschriebenen Monitoringsystems. Neben einer semantischen Beschreibung der im LandModell^{TUM} abgebildeten Objektarten, ihrer Eigenschaften und Beziehungen zueinander enthält das Datenmodell zudem grundlegende Konzepte zur Modellierung der verschiedenen Facetten ihrer zeitlichen Entwicklung.

Die folgenden Abschnitte benennen zunächst wesentliche Forschungsfragen hinsichtlich der Ausgestaltung des Informationsmodells. Auf die Vorstellung grundlegender Modellierungskonzepte folgt eine Beschreibung der konzeptuellen Überlegungen zur Abbildung der verschiedenen Facetten der zeitlichen Fortentwicklung der einzelnen Komponenten. Auf eine Darstellung der dem Informationsmodell zugrundeliegenden Normen folgt eine ausführliche Erläuterung der Struktur und der Inhalte des entwickelten Informationsmodells. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion des konzeptuellen Datenmodells.

4.1 Forschungsfragen

Im Hinblick auf die eingangs beschriebenen Ziele des LandModell^{TUM} ergeben sich für die Ausgestaltung des Informationsmodells verschiedene Forschungsfragen. Als Forschungsfragen dieses Abschnitts sind zu benennen:

1. Wie ist das Informationsmodell auszugestalten, um es als skalenübergreifendes, raumzeitliches und zunächst anwendungsneutrales Abbild der Kulturlandschaft für die Bearbeitung interdisziplinärer Fragestellungen einsetzen zu können?
2. Welche Konzepte sind erforderlich, um einzelne Elemente der Kulturlandschaft als stabile Bezugsobjekte zur Fusion von interdisziplinärer Information über einen möglichst langen Zeitraum aufrecht zu erhalten?
3. Wie lassen sich die verschiedenen Facetten einer zeitlichen Evolution von Objekten zentral innerhalb des Informationsmodells verankern?
4. Wie lassen sich veränderliche Objektzustände und objekt- bzw. objektartenübergreifende Übergänge explizit im Informationsmodell abbilden und umfassend mit Semantik versehen?
5. Sind die Konzepte bestehender ISO-Normen ausreichend, um Veränderungen einzelner Komponenten der Kulturlandschaft umfassend und räumlich-semantisch kleinteilig abzubilden?

4.2 Grundlegende Modellierungskonzepte des LandModell^{TUM}

Dem Aufbau des Informationsmodells liegt eine Reihe prinzipieller Modellierungskonzepte zugrunde, welche in den folgenden Abschnitten dargelegt werden. Zu diesen Konzepten zählt neben dem modularen Aufbau des Modells, der geometrisch-semantisch kohärenten Abbildung von Objekten, das Konzept der Erweiterbarkeit und der semantischen Anreicherung von Objekten insbesondere auch das Konzept einer Kopplung des Informationsmodells mit Methoden und Werkzeugen zur Analyse verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft.

4.2.1 Modularisierung

Das LandModell^{TUM} untergliedert sich in ein Kernmodul (*Core*) und darauf aufbauende, thematische Module. Damit folgt das LandModell^{TUM} in seinem grundlegenden strukturellen Aufbau dem erfolgreichen Modularisierungskonzept des internationalen OGC[®]-Standards CityGML (vgl. Abschnitt 3.3.2). Während das Kernmodul des LandModell^{TUM} insbesondere grundlegende Komponenten und Konzepte mit Relevanz für alle thematischen Module beschreibt behandeln die hierauf aufbauenden, thematischen Module fachlich unterschiedliche Aspekte der Kultur- bzw. Agrarlandschaft.

4.2.2 Geometrisch-semantische Kohärenz

Das LandModell^{TUM} sieht eine geometrisch-semantisch kohärente Abbildung einzelner Elemente des Modells vor. Geometrieobjekte verfügen dadurch über eine klare Semantik und semantische Objekte über Informationen zur jeweiligen räumlichen Ausdehnung. Als Vorbild dient dabei die bereits im Kontext des CityGML-Standards (vgl. Abschnitt 3.3.2) erfolgreich umgesetzte geometrisch-semantisch kohärente Modellierung der einzelnen Objekte innerhalb des 3D Stadt- und Landschaftsmodells (Gröger et al. 2012; Stadler und Kolbe 2007).

4.2.3 Erweiterbarkeit

Ziel der Entwicklung des LandModell^{TUM} ist die Entwicklung eines zunächst anwendungsneutralen, universellen Informationsmodells zur Abbildung der Kulturlandschaft. Das semantische Modell beschreibt daher grundlegende Klassen und Attribute mit Relevanz für verschiedene Akteure bzw. unterschiedliche Anwendungen. Zur bedarfsgerechten Vervollständigung des Informationsmodells greift das LandModell^{TUM} die bereits im Kontext des OGC[®]-Standards CityGML (vgl. Abschnitt 3.3.2) erfolgreich umgesetzten Erweiterungskonzepte *generische Attribute*, *generische Objekte* und das sog. *ADE-Konzept* auf (vgl. Gröger et al. 2012; Kolbe 2009; Krüger und Kolbe 2012; Schulte und Coors 2008). Über generische Attribute und Objekte ist es möglich, bestehende Objektarten um zusätzliche Eigenschaften bzw. das Modell um zusätzliche Objektarten zu erweitern. Das *ADE-Konzept* hingegen ermöglicht eine umfassende, systematische Erweiterung des Informationsmodells für bestimmte Anwendungsbereiche.

4.2.4 Konzept der semantischen Anreicherung

In engem Zusammenhang mit dem Konzept der Erweiterbarkeit steht auch das Konzept der semantischen Anreicherung von Objekten um interdisziplinäre Information. So soll beispielsweise das Informationsmodell unmittelbar mit Analysemethoden unterschiedlicher Fachdisziplinen gekoppelt werden (siehe Teil II). Sämtliche der in den Analysen gewonnenen Informationen fließen zurück zu den betreffenden, räumlich-semantischen Einheiten des Modells wo sie für weiterführende Analysen zur Verfügung stehen. Entsprechend sind Voraussetzungen zu schaffen, um einzelne Objekte semantisch anreichern und Information auf Ebene der betreffenden Einheiten speichern zu können. Das Konzept der semantischen Anreicherung erleichtert insgesamt eine umfassende und interdisziplinäre Betrachtung verschiedener Fragestellungen der Kulturlandschaft. Bei den zur semantischen Anreicherung genutzten Informationen könnte es sich neben den Ergebnissen komplexer Analysemethoden insbesondere auch um Informationen aus externen Informationssystemen bzw. Datenbeständen handeln.

4.2.5 Kopplung des Modells mit komplexen Analysemethoden

Eine grundlegende Idee der Verwendung des LandModell^{TUM} als Monitoringsystem besteht in der Kopplung des Modells mit Analysemethoden zur Betrachtung verschiedener Facetten der Kulturlandschaft und ihrer zeitlichen Entwicklung. Die Werkzeuge sollen dabei auf die im Modell abgebildeten Elemente zugreifen, diese verarbeiten und die Ergebnisse anschließend kleinteilig und mit Bezug auf die jeweils betreffenden Objekte im Informationssystem ablegen. Damit stehen die in den Analysen gewonnenen Informationen auf Ebene von Einzelobjekten für weiterführende und aufbauende Betrachtungen zur Verfügung.

4.3 Konzeptuelle Überlegungen zur Abbildung verschiedener Facetten der zeitlichen Veränderung

Neben der Möglichkeit zur Rekonstruktion historischer Zustände und Konstellationen von Objekten zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit besteht eine grundlegende Anforderung an das Informationsmodell darin, Veränderungen explizit abzubilden und damit für Analysen zugänglich zu machen. Damit sind für eine umfassende Verankerung der Dimension Zeit im Informationsmodell einerseits Lebensdauern von (Geo-)Objekten abzubilden sowie andererseits auch Zustandsveränderungen und auch objekt- und objektartenübergreifende Übergänge explizit zu erfassen. Die folgenden Abschnitte erläutern die konzeptuellen Überlegungen zur Abbildung von Objektlebensdauern, zur Modellierung von objekt- bzw. objektartenübergreifenden Übergängen sowie zur Historisierung von Objektzuständen.

4.3.1 Modellierung der Objektlebensdauer

Entsprechend dem in der Geoinformatik bereits gebräuchlichen Ansatz zur Abbildung von Objektlebensdauern verfügen die im LandModell^{TUM} abgebildeten Geobjekte über eine räumliche wie auch über eine zeitliche Ausdehnung. Die räumliche Ausdehnung ist dabei

über die Objektgeometrie und die zeitliche Ausdehnung über die Objektlebensdauer begrenzt. Punktförmige Geoobjekte werden dadurch zu raumzeitlichen Linien, linienhafte Geoobjekte zu raumzeitlichen Flächen und flächenhafte Geoobjekte zu raumzeitlichen Prismen. Abbildung 5 veranschaulicht dieses Prinzip exemplarisch anhand flächenhafter Geoobjekte. Im Beispiel existieren zum Zeitpunkt t_0 die Objekte A, B und C. Während sich die Lebensdauer des Objekts C über t_4 hinausgehend erstreckt, endet das Lebenszeitintervall für die Objekte A und B zum Zeitpunkt t_2 . Gleichzeitig beginnt zum Zeitpunkt t_2 das Lebenszeitintervall des Objekts D, welches sich bis t_3 erstreckt. Zum Zeitpunkt t_3 beginnt die Lebensdauer der Objekte E und F, welche ab t_3 bis über t_4 hinausgehend existieren. Konstellationen verschiedener Komponenten zu einem beliebigen Zeitpunkt der Vergangenheit ergeben sich aus den Objekten, die zum betrachteten Zeitpunkt Gültigkeit besitzen.

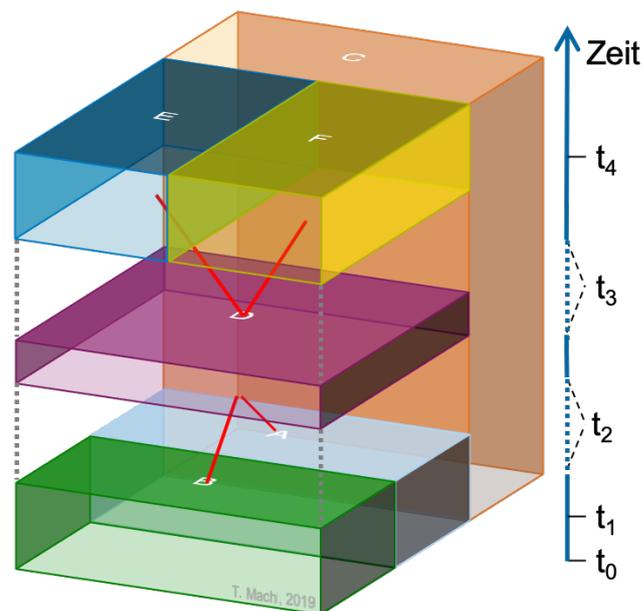


Abbildung 5: Hybrider Ansatz zur expliziten Abbildung von Objektlebensdauern (symbolisiert über raumzeitliche Volumenkörper) und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit (dargestellt als rote Übergänge)

Zusätzlich zur Objektlebensdauer sieht das LandModell^{TUM} eine explizite Abbildung von objekt- bzw. objektartenübergreifenden Übergangsbeziehungen über die Zeit vor. Die Überlegungen zur Abbildung dieser Übergangsbeziehungen sind Gegenstand des nachfolgenden Abschnitts.

4.3.2 Modellierung objektübergreifender Übergangsbeziehungen

Um auch objektübergreifende Übergänge zwischen einzelnen Elementen über die Zeit für Analysen zugänglich zu machen, sind diese in Form von Übergangsbeziehungen abzubilden und entsprechend mit einer semantischen Beschreibung zu versehen. Die Umformungs- und Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit sind im LandModell^{TUM} über eine Graphstruktur repräsentiert. Entstehende sowie auch untergehende Geoobjekte werden dabei als Knoten und raumzeitliche Übergangsbeziehungen zwischen den betreffenden Objekten als Kanten eines Graphen betrachtet. Diese Kanten lassen sich mit zusätzlichen Informationen zum Zeitpunkt des Auftretens oder zur Art der objektübergreifenden Verände-

rungsbeziehung sowie auch mit einer Beschreibung der Reallokation einzelner Geometriefragmente anreichern.

In Abbildung 5 sind diese Beziehungen als rote Linien symbolisiert. Die Übergangsbeziehungen verfügen dabei über keine zeitliche Ausdehnung sondern lediglich über eine Position entlang der Zeitachse. Im gezeigten Beispiel führt eine Zusammenlegung der Objekte A und B zum Zeitpunkt t_2 zur Entstehung des Objekts D, aus welchem wiederum zum Zeitpunkt t_3 die Objekte E und F hervorgehen. Die Übergänge sind explizit erfasst und in der Abbildung dargestellt.

Anders als im dargestellten Beispiel, in welchen Objekte (geometrisch) vollständig in anderen Geoobjekten aufgehen bzw. ausschließlich aus anderen vollständigen Objekten hervorgehen, treten in der Realität häufig Mischformen der Übergänge zwischen Objekten über die Zeit auf. Beispielhaft sei ein Übergangsereignis angeführt, bei dem Teilbereiche mehrerer Geoobjekte abgespalten und anschließend zu einem neuen Geoobjekten verschmolzen werden (sog. *Reallokation*; vgl. Abschnitt 3.2.4). Um derartige Übergänge modellieren und umfassend mit Semantik versehen zu können, sieht das LandModell^{TUM} neben der Abbildung der Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen zwischen Objekten auch die Abbildung der Schicksale einzelner Geometriefragmente vor. Entsprechend verfügen die Kanten des Graphen neben Angaben zu Art und Zeitpunkt des Übergangs zwischen Objekten auch eine detaillierte Beschreibung von einzelnen Übergangsereignissen einschließlich ihrer jeweiligen geometrischen Ausdehnung bzw. den jeweils betroffenen Geometriebereiche. Somit lässt sich für jedes Geoobjekt und jeden Bestandteil desselben die Historie einschließlich der Entstehung und des Untergangs nachvollziehen.

Das grundlegende Konzept ist schematisch in Abbildung 6 am Beispiel des Übergangs zwischen den Objekten A und B zum Zeitpunkt t_n in die Objekte C und D zu einem späteren Zeitpunkt t_{n+1} veranschaulicht. Dabei sind einerseits die Übergangsbeziehungen zwischen Objekten analog zum Beispiel in Abbildung 5 in Form von roten Verbindungslinien sowie andererseits die Schicksale von Geometriefragmenten als blaue Verbindungslinien symbolisiert. Im Beispiel geht das Objekt C als Ergebnis einer Abspaltung aus dem Objekt A hervor. Entsprechend lässt sich die Beziehung zwischen A und C sowie auch das Schicksal des Geometriefragments A_1 als Abspaltung klassifizieren. Gleichzeitig wird das Objekt B mit einer Teilgeometrie des Objekts A zum neuen Objekt D verschmolzen. Damit ergibt sich für D eine Abstammungsbeziehung zu den Objekten A und B, wobei diese für die Geometriefragmente A_2 und B_1 Gültigkeit besitzen. Beide Geometriefragmente A_2 und B_1 werden in das neue Geoobjekt D eingegliedert. Der Geometriebereich A_3 ist zu t_{n+1} nicht mehr Bestandteil eines Geoobjekts des selben Typs wie A, B, C bzw. D. Für diesen Geometriebereich findet ein Übergang in eine andere Objektart statt.

Eine ausführliche Beschreibung möglicher Übergangsbeziehungen zwischen Objekten und auch eine Beschreibung von Schicksalen einzelner Geometriefragmente findet sich in Abschnitt 6.3.5.

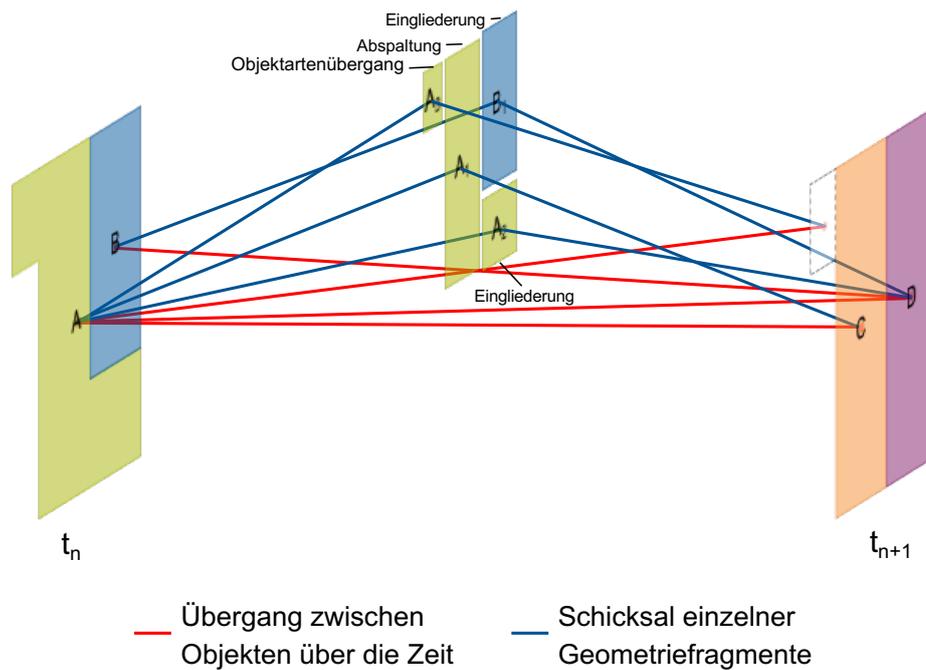


Abbildung 6: Konzept zur Abbildung von objektübergreifenden Übergängen zwischen Objekten zum Zeitpunkt t_{n+1} ; Übergänge zwischen Objekten sind als rote, Schicksale einzelner Geometriefragmente als blaue Verbindungen symbolisiert

4.3.3 Konzept zur Versionierung von Objektzuständen

Zusätzlich zur Abbildung von Objektlebensdauer und Übergangsbeziehungen zwischen Geobjekten erfordert eine umfassende Abbildung der Dimension Zeit auch eine Historisierung von Objektzuständen. Bestehende Versionierungskonzepte, wie sie beispielsweise im Kontext der AAA[®]- oder INSPIRE-Modellierung eingesetzt werden, legen den Fokus hauptsächlich auf die Möglichkeit zur Rekonstruktion von Objekten bzw. Objektkonstellationen zu bestimmten Zeitpunkten der Vergangenheit. Hierzu werden Objektversionen (= Zustände eines Objekts zu verschiedenen Zeitpunkten) als vollständige Kopie eines Objekts mit zeitlich begrenzter Gültigkeit mit Bezug auf stabile Objektidentifikatoren abgebildet. Die bestehenden Ansätze bedingen einerseits eine redundante Abbildung unveränderter Attributwerte und erfordern andererseits für die Erkennung von Zustandsveränderungen einzelner Eigenschaften nach wie vor einen Vergleich der unterschiedlichen Versionen eines Objekts. Darüber hinaus ist es aufwendiger, bestehende Objekte um zusätzliche, zeitlich veränderliche Information anzureichern, da die Information nicht nur dem Objekt sondern unter Umständen auch einer Objektversion zuzuordnen ist.

Ziel des LandModell^{TUM} ist es, neben der Möglichkeit zur Rekonstruktion von Objektzuständen insbesondere auch Zustandsveränderungen von Objekten explizit abzubilden und dadurch weiterführenden Analysen auf einfache Art und Weise zugänglich zu machen. Aus diesem Grund sieht das LandModell^{TUM} eine Historisierung von Objektzuständen über eine Versionierung von Attributzuständen vor. Diesem Ansatz folgend verfügen nicht nur Objekte und Beziehungen sondern auch Eigenschaften von Objekten über eine zeitliche Ausdehnung bzw. ein Gültigkeitszeitintervall.

Abbildung 7 veranschaulicht dieses Konzept und greift dazu das bereits in Abbildung 5 genutzte Beispiel auf. In der Darstellung ist die zeitliche Dimension nach rechts und die räumliche

liche Dimension nach oben angetragen. Objektübergreifende Übergangsbeziehungen sind in der Visualisierung als vertikale rote Verbindungen zwischen den Objekten dargestellt. Im Hinblick auf eine möglichst hohe zeitliche Stabilität der im LandModell^{TUM} abgebildeten Objekte (= langfristige Aufrechterhaltung der Objektlebensdauer) wird im entwickelten Ansatz auch die Geometrie als versionierbare Objekteigenschaft betrachtet. Diese - in der Geoinformatik eher unübliche - Trennung von Objekt und dessen Geometrie ermöglicht es, im Falle des Auftretens von für die Objektbildung irrelevanten Veränderungen der Geometrie auf die Bildung neuer Objekte verzichten zu können. Allerdings erfordert dieser Ansatz eine klare Definition von Objektbildungsregeln. Dabei ist festzulegen, bis zu welchem Grad der Veränderung die Objektidentität aufrecht erhalten wird (siehe Abschnitt 6.3.1). Zeitliche Übergangsbeziehungen zwischen Geometriezuständen eines Objekts sind dabei ebenfalls explizit abgebildet. In der Darstellung sind diese in Form von gepunkteten, roten Übergängen symbolisiert.

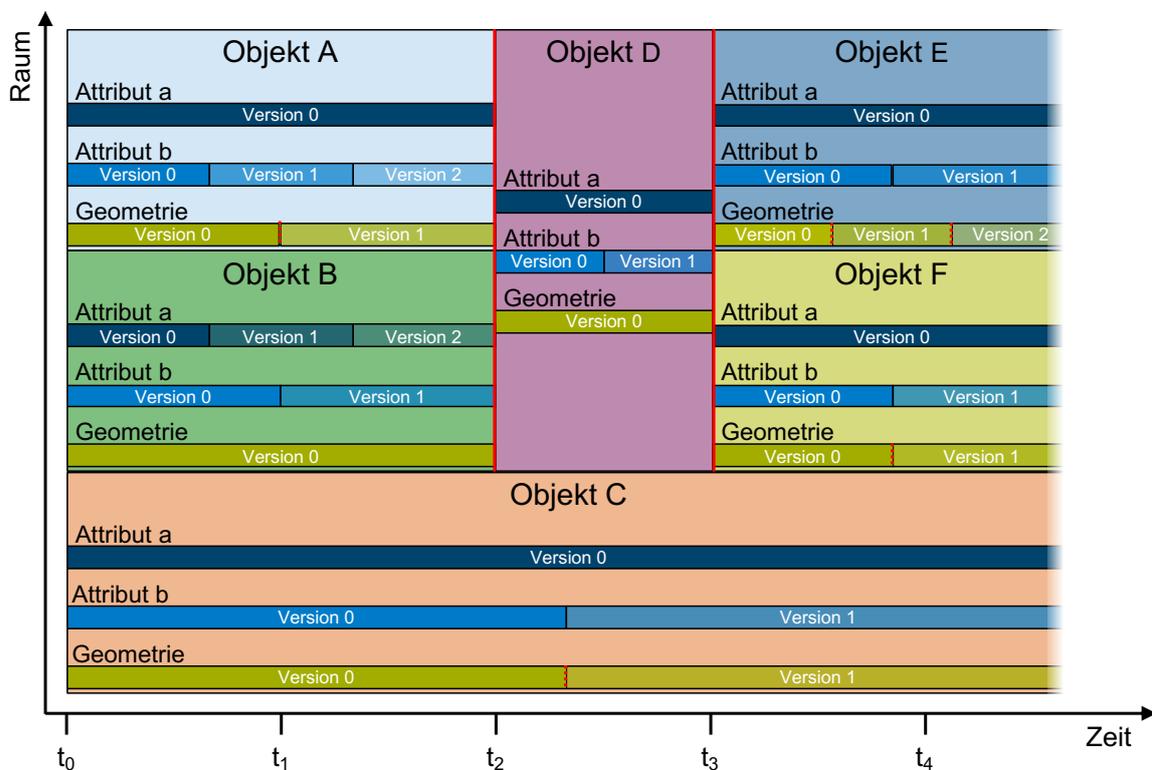


Abbildung 7: Historisierung von Objektzuständen in Form einer Versionierung von Attributwertbelegungen; in der Darstellung ist die zeitliche Dimension nach rechts und die räumliche Dimension nach oben angetragen; Geoobjekte verfügen über eine räumliche wie auch über eine zeitliche Ausdehnung; Attribute eines Objekts besitzen eine zeitliche Ausdehnung

Zustände und Konstellationen von Geoobjekten zu einem beliebigen Moment der Vergangenheit ergeben sich dabei aus den Objekten, Beziehungen und den jeweiligen Attributzuständen, die zum betrachteten Zeitpunkt Gültigkeit besitzen. Aufgrund der Versionierung von Objektzuständen auf Attributebene steht über die Lebensdauer eines Objekts hinweg für jedes Attribut eine Zeitreihe der Attributwertbelegungen zur Verfügung. Diese Zeitreihen sind unmittelbar für Analysen zugänglich.

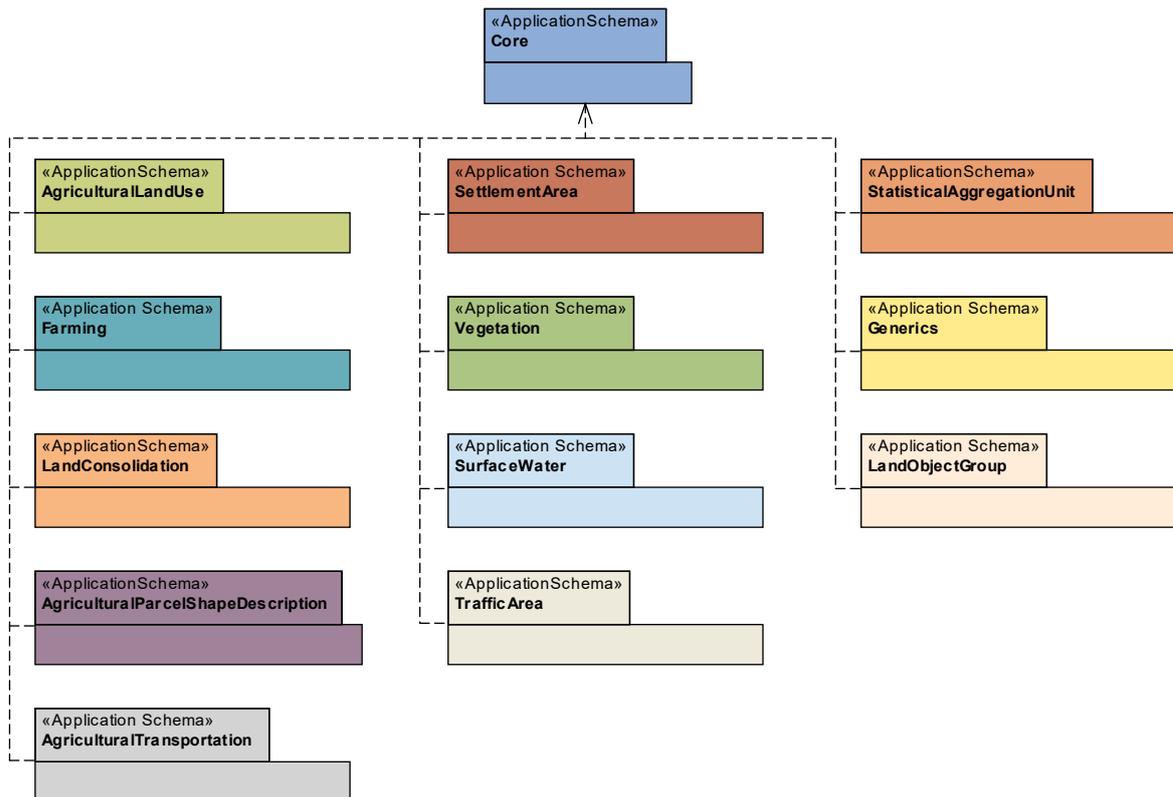
4.4 Zugrundeliegende Normen und Standards

Der Aufbau des Informationsmodells erfolgt mit Hilfe von UML-Klassen- und Paketdiagrammen und unter Berücksichtigung internationaler Normen der ISO 191xx Familie. Die Konformität des Informationsmodells zu internationalen Normen und Standards gewährleistet ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen Analysewerkzeugen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, sowie Datenhaltungs-, Bereitstellungs- und Visualisierungskomponenten aus dem GI-Bereich. Der Modellierung liegen insbesondere folgende ISO-Normen zu Grunde:

- ISO 19101:2002, Geographic Information - Reference model
- ISO 19103:2005, Geographic Information - Conceptual schema language
- ISO 19107:2003, Geographic Information - Spatial Schema
- ISO 19108:2005, Geographic information - Temporal schema
- ISO 19109:2005, Geographic Information - Rules for Application Schemas
- ISO 19111:2003, Geographic information - Spatial referencing by coordinates
- ISO 19136:2009, Geographic information - Geography Markup Language (GML)
- ISO 19148:2012, Geographic information - Linear Referencing

4.5 Pakete des LandModell^{TUM}

Das dem LandModell^{TUM} zugrundeliegende Informationsmodell setzt sich aus einem Kernmodul (*Core*) und zwölf thematischen Modulen zusammen, die sich jeweils mit unterschiedlichen Aspekten der Kulturlandschaft beschäftigen. Abbildung 8 zeigt das UML-Paketdiagramm der im LandModell^{TUM} enthaltenen Module. Grundlegende Konzepte des Modells sind dabei im *Core*-Modul beschrieben. Die thematischen Pakete setzen auf dem *Core*-Paket auf und behandeln die landwirtschaftliche Flächennutzung (Paket *AgriculturalLandUse*), die Bewirtschaftung (Paket *Farming*), Verfahrensgebiete der Flurneuordnung (Paket *LandConsolidation*), Siedlungsflächen (Paket *SettlementArea*), Vegetation (Paket *Vegetation*), Oberflächengewässer (Paket *SurfaceWater*), Verkehrsflächen (Paket *TrafficArea*) sowie räumliche Einheiten zur statistischen Aggregation von Analyseergebnissen (Paket *StatisticalAggregationUnit*). Die Pakete *Generics* und *LandObjectGroup* beschreiben in Anlehnung an den internationalen OGC[®]-Standard CityGML Konzepte zur Erweiterung des Informationsmodells bzw. Konzepte zur Ausbildung von Objektgruppen. Zusätzlich zeigt das UML-Paketdiagramm mit den Paketen *AgriculturalParcelShapeDescription* und *AgriculturalTransportation* auch bereits Module zur Abbildung der Ergebnisse durchgeführter Analysen zur parametrischen Beschreibung landwirtschaftlicher Parzellen (siehe Kapitel 7) sowie zur Untersuchung von Transportpfaden in der Landwirtschaft (siehe Kapitel 8, 9 und 10).

Abbildung 8: UML-Paketdiagramm der im LandModell^{TUM} abgebildeten Module

4.5.1 Modul Core

Das *Core*-Modul bildet den Kern des LandModell^{TUM}. Es beschreibt – ähnlich dem internationalen OGC[®]-Standard CityGML – grundlegende Elemente und Konzepte mit Gültigkeit für die übrigen thematischen Module und die darin modellierten Klassen. So enthält das Modul neben abstrakten Basisklassen und grundlegenden Beziehungen insbesondere auch die Herangehensweise zur umfassenden Abbildung zeitlicher Aspekte (siehe Abschnitt 4.3). Abbildung 9 zeigt den Inhalt des *Core*-Moduls mit den darin abgebildeten Klassen. Der mittlere Abschnitt des UML-Klassendiagramms enthält dabei die grundlegenden Klassen und die grundsätzliche Aggregationshierarchie des Modells. Im oberen Teil findet sich das Konzept zur Abbildung der zeitlichen und räumlichen Topologie der im LandModell^{TUM} abgebildeten Objekte. Die benötigten Konzepte zur Abbildung der über die Zeit veränderlichen Attribute sind im unteren Teil der Abbildung beschrieben.

Gemäß dem semantischen Modell setzt sich das LandModell^{TUM} (Klasse *LandModell*) aus (Kind-)Elementen der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* zusammen. Damit folgt die Modellierung des LandModell^{TUM} dem Vorbild CityGML. Die abstrakte Klasse *AbstractLandObject* bildet die Grundlage aller thematischen Klassen des Modells und vererbt damit auch sämtliche Eigenschaften und Beziehungen an die daraus abgeleiteten Kindklassen. Die abstrakte Klasse verfügt über Attribute zur Abbildung der Objektlebensdauer innerhalb eines Datenbestands (Attribute *creationDate* und *terminationDate*) sowie innerhalb der physischen Realität (Attribute *validFrom* und *validTo*). Zusätzlich besitzt die abstrakte Klasse *AbstractLandObject* die Möglichkeit zur Ausbildung von Referenzen auf externe Objekte. Dieses Konzept entstammt ebenfalls dem Vorbild CityGML. Entsprechend dem Konzept der semantischen Anreicherung von Objekten um die Ergebnisse von Analysemethoden besitzt

die abstrakte Klasse *AbstractLandObject* zudem eine Assoziation zur abstrakten Klasse *AbstractAnalysisResult*.

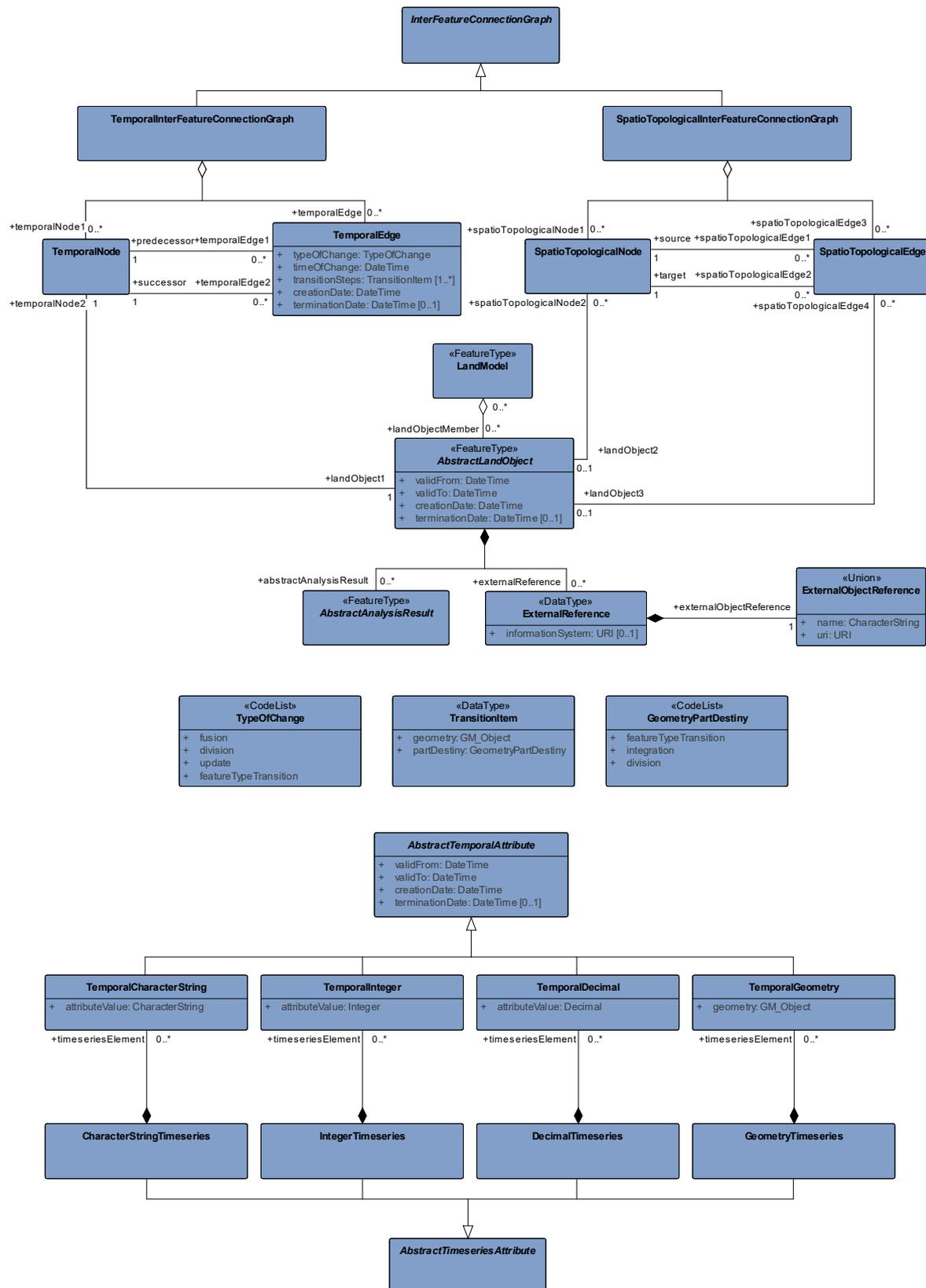


Abbildung 9: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Kernmoduls (Core)

Neben den Basisklassen und den grundlegenden Assoziationen zwischen diesen beschreibt das *Core*-Modul auch die räumlich- bzw. zeitlich-topologischen Beziehungen zwischen Elementen des LandModell^{TUM} in Form einer Graphstruktur. So besitzt das *Core* Modul mit der abstrakten Klasse *InterFeatureConnectionGraph* eine Möglichkeit, topologische Beziehungen zwischen Objekten, welche einerseits räumlicher (Spezialisierung *SpatioTopologicalInterFeatureConnectionGraph*) sowie andererseits auch zeitlicher Natur (Spezialisierung *TemporalInterFeatureConnectionGraph*) sein können, in Form eines Graphen abzubilden.

Die Klasse *SpatioTopologicalInterFeatureConnectionGraph* setzt sich aus Elementen der Klassen *SpatioTopologicalNode* (= Knoten) und *SpatioTopologicalEdge* (= Kanten) zusammen. Kanten besitzen grundsätzlich einen Start- und einen Endknoten, Knoten können über Kanten mit anderen Knoten verbunden sein. Sowohl Knoten als auch Kanten lassen sich als Instanzen der Kindklassen der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* realisieren. Damit können Instanzen einer Kindklasse der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* über Instanzen von Subklassen der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* topologisch verbunden sein.

Zusätzlich zur Abbildung räumlich-topologischer Beziehungen zwischen Elementen des Modells enthält das *Core*-Modul auch ein Konzept zur Abbildung der zeitlich-topologischen Übergangsbeziehungen zwischen Instanzen von Subklassen der abstrakten Klasse *AbstractLandObject*. Analog zur räumlich-topologischen Beziehung erfolgt dabei die Abbildung dieser Verknüpfungen in Form eines Graphen, welcher im Modell als Klasse *TemporalInterFeatureConnectionGraph* abgebildet ist. Dieser setzt sich aus Knoten (Klasse *TemporalNode*) und Kanten (Klasse *TemporalEdge*) zusammen. Dabei entsprechen Instanzen der Subklassen der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* Knoten des Graphen. Zeitliche Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen sind im Modell über die Klasse *TemporalEdge* abgebildet. Die Klasse *TemporalEdge* besitzt Attribute zur detaillierten, semantischen Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit. Hierzu zählen Attribute zur Abbildung des Zeitpunkts (Attribut *timeOfChange*) und Art (Attribut *typeOfChange*) einer zeitlichen Übergangsbeziehung als auch über eine Auflistung der beobachteten, räumlich-semantischen Einzelschicksale geometrischer Teilbereiche von Geobjekten (Attribut *transitionSteps*).

Die zulässigen Arten von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit sind in der *CodeList TypeOfChange* beschrieben. Demnach ist grundsätzlich zwischen einer Zusammenlegung (*fusion*), einer Teilung (*division*), einem Update (*update*) oder aber einem Übergang in eine andere Objektart (*featureTypeTransition*) zu unterscheiden. Die Abbildung des zeitlichen Übergangs zwischen zwei Objekten als Summe einzelner Veränderungsschritte ist über das Attribut *transitionSteps* realisiert. Dieses Attribut besitzt die Multiplizität 1..* und ist vom komplexen Datentyp *TransitionItem*. Dieser komplexe Datentyp beinhaltet sowohl eine Angabe zur geometrischen Ausdehnung (Attribut *geometry*) als auch über eine Beschreibung des Schicksals des betreffenden Geometriefragments (Attribut *partDestiny*). Die möglichen Einzelschicksale einzelner Geometriefragmente beim zeitlichen Übergang zwischen Objekten ist in der *CodeList GeometryPartDestiny* festgelegt.

Das *Core*-Modul des LandModell^{TUM} enthält darüber hinaus auch Konzepte zur Abbildung von Attributen mit zeitlich begrenzter Gültigkeit sowie von Zeitreihenattributen. So verfügt die abstrakte Klasse *AbstractTemporalAttribute* sowohl über Attribute zur Beschreibung der zeitlichen Gültigkeit eines Attributwerts innerhalb des Datenbestands (Attribute *creationDate* und *terminationDate*) als auch zur Abbildung der Gültigkeit eines Attributwerts in der physischen Realität (Attribute *validFrom* und *validTo*). Die Klassen *TemporalCharacterString*, *TemporalInteger*, *TemporalDecimal* und *TemporalGeometry* sind Spezialisierung abstrakten Klasse *AbstractTemporalAttribute* modelliert und erben damit die Eigenschaften der El-

ternklasse. Sie dienen zur Abbildung von Zeichenketten-, Ganzzahlen-, Dezimalzahlen und Geometrieattributen mit zeitlich begrenzter Gültigkeit und verfügen jeweils über ein Attribut *attributeValue* vom entsprechenden Datentyp.

Mit Hilfe der abstrakten Klasse *AbstractTimeseriesAttribute* sieht das *Core*-Modul zusätzlich die Abbildung von Attributzeitreihen vor. Die Modellierung temporaler Attribute und Attributzeitreihen erfolgt dabei bewusst nicht in Form von Datentypen sondern in Form von Klassen, wodurch sich beispielsweise auch Referenzen auf Zeitreihen und deren Einträge ausbilden lassen. Die Klassen *CharacterStringTimeseries*, *IntegerTimeseries*, *DecimalTimeseries* und *GeometryTimeseries* sind Spezialisierungen dieser Klasse und setzen sich jeweils aus entsprechenden Attributen mit zeitlich begrenzter Gültigkeit zusammen.

4.5.2 Modul *AgriculturalLandUse*

Das Modul *AgriculturalLandUse* beschreibt Klassen und Beziehungen zur Repräsentation der landwirtschaftlichen Flächennutzung. Abbildung 10 zeigt den Inhalt des Moduls als UML-Klassendiagramm. Die abstrakte Klasse *AbstractAgriculturalPlot* ist eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des *Core*-Moduls und erbt damit auch sämtliche Eigenschaften und Beziehungen. Zur Modellierung der räumlichen Ausdehnung enthält *AbstractAgriculturalPlot* das Attribut *geometry* vom Typ *GeometryTimeseries* (Polygon). Damit ist es möglich, auch Zeitreihen der geometrischen Ausdehnung von Objekten im Modell zu berücksichtigen. Zur Abbildung von Bewirtschaftungsbeziehungen verfügt die Klasse *AbstractAgriculturalPlot* über eine Beziehung zur Klasse *Farm* des Moduls *Farming* (vgl. Abschnitt 4.5.3). Um die zeitlich begrenzte Gültigkeit dieser Beziehung im Modell berücksichtigen zu können, ist diese als Assoziationsklasse *Management* abgebildet. Die Beziehungsklasse besitzt Attribute zur Modellierung der Gültigkeit einer Beziehung in der physischen Realität (Attribute *validFrom* und *validTo*) sowie auch innerhalb des Datenbestandes (Attribute *creationDate* und *terminationDate*).

Feldblock (Klasse *PhysicalBlock*), Feldstück (Klasse *FarmerBlock*) und Schlag (Klasse *AgriculturalParcel*) sind instanziierbare Kindklassen der abstrakten Klasse *AbstractAgriculturalPlot*. Die semantische Differenzierung und Spezialisierung folgt schematisch der Modellierung landwirtschaftlicher Referenzparzellen in Inan et al. (2010) bzw. Annex H des LADM (ISO 19152:2013). Die Definition dieser Referenzparzellen folgt hier den Vorgaben der *Verordnung über die Durchführung von Stützungsregelungen und des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems* (InVeKoSverordnung - InVeKoSV), wonach die in den einzelnen Klassen abgebildeten Einheiten wie folgt definiert sind:

- **Feldblock** (Klasse *PhysicalBlock*): „eine von dauerhaften Grenzen umgebene zusammenhängende landwirtschaftliche Fläche eines oder mehrerer Betriebsinhaber“ (§ 3 InVeKoSV). Ein Feldblock kann ein oder mehrere Feldstücke bzw. Schläge enthalten.
- **Feldstück** (Klasse *FarmerBlock*): „eine zusammenhängende landwirtschaftliche Fläche eines Betriebsinhabers“ (§ 3 InVeKoSV). Ein Feldstück kann dabei ein oder mehrere Schläge umfassen.
- **Schlag** (Klasse *AgriculturalParcel*): „eine zusammenhängende landwirtschaftliche Fläche, die von einem Betriebsinhaber mit einem von der Landesstelle vor der Antragstellung für die Zwecke der Antragsbearbeitung festgelegten Nutzungscode im Sammelantrag angegeben wird“ (§ 3 InVeKoSV). Ein Schlag wird mit einer Kultur bestellt.

Die Klasse *FarmerBlock* beinhaltet neben dem Flächenidentifikator des InVeKoS (Attribut *fid*) auch ein Attribut zur Abbildung der vom Grünlandstatus betroffenen Fläche (Attribut *areaGrasslandStatus*) Alle Attribute sind als Zeitreihe entsprechenden Datentyps im Modell berücksichtigt.

Die Klasse *AgriculturalParcel* enthält mit dem Attribut *crop* Angaben zur zeitlichen Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen auf einem Schlag. Das Attribut ist daher als Zeitreihenattribut vom Typ *CropTimeseries* modelliert. Die Klasse *CropTimeseries* stellt eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractTimeseriesAttribute* des Core-Moduls dar und setzt sich aus Elementen der Klasse *TemporalCropAttribute* zusammen, welche wiederum einer Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractTemporalAttribute* des Core-Moduls entspricht. Der

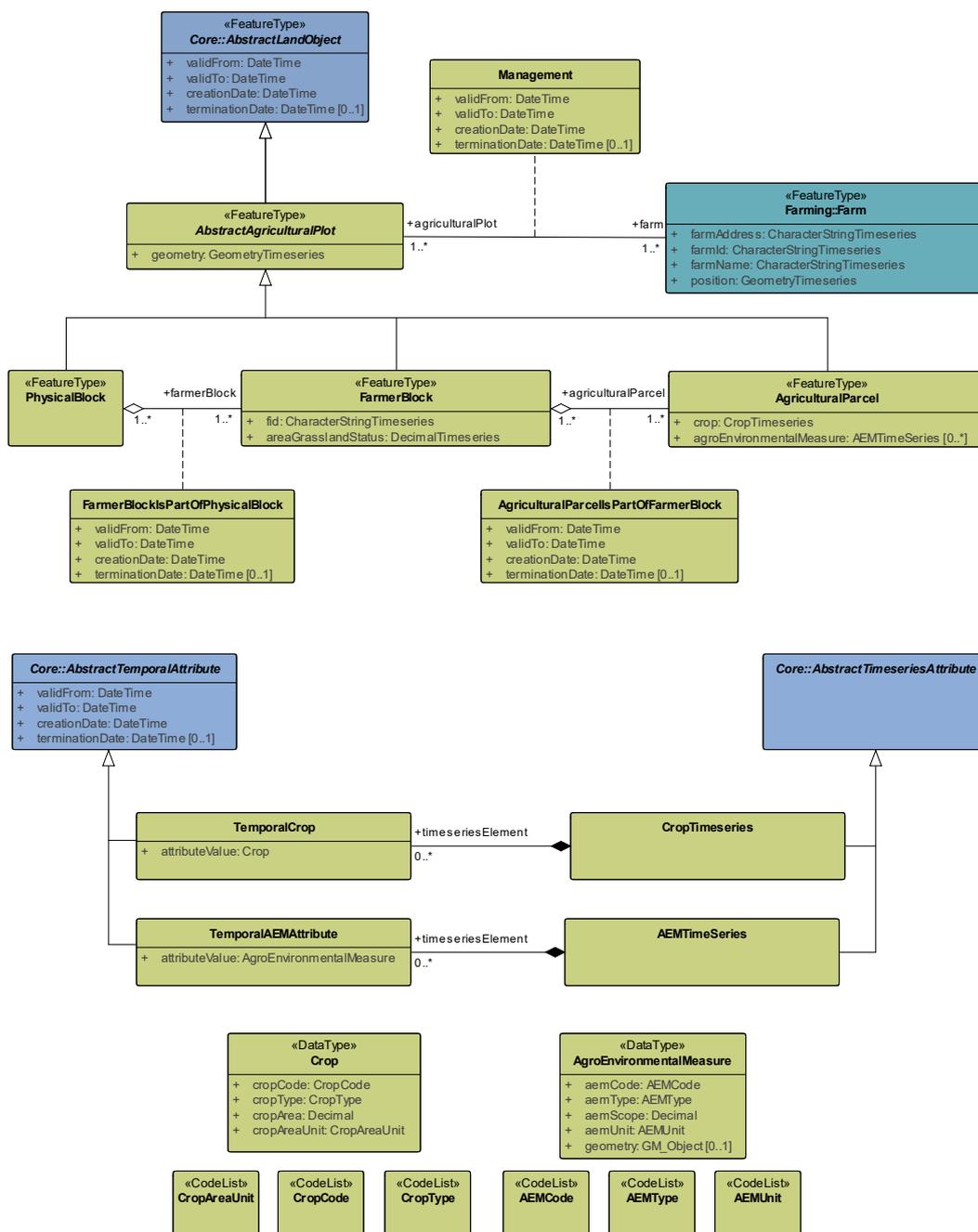


Abbildung 10: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets AgriculturalLandUse

Attributwert des darin abgebildeten Attributs *attributeValue* ist vom Datentyp *Crop*, welcher einen komplexen Datentyp mit Attributen zur Angabe des Flächennutzungscode (Attribut *cropCode*), der Kulturart (Attribut *cropType*), der Flächengröße (Attribut *cropArea*) sowie der Maßeinheit der Fläche (Attribut *cropAreaUnit*) darstellt.

Darüber hinaus verfügt die Klasse *AgriculturalParcel* mit dem Attribut *agroEnvironmentalMeasure* über die Möglichkeit, schlagbezogene Agrarumweltmaßnahmen im Modell abzubilden. Ähnlich der Modellierung von Feldfrüchten ist dieses Attribut als Zeitreihenattribut vom Typ *AEMTimeseries* ausgelegt. Diese Klasse stellt eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractTimeseriesAttribute* dar und besteht aus Elementen der Klasse *AEMAttribute*. *AEMAttribute* repräsentiert eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractTemporalAttribute* und besitzt ein Attribut *attributeValue* vom komplexen Datentyp *AgroEnvironmentalMeasure*.

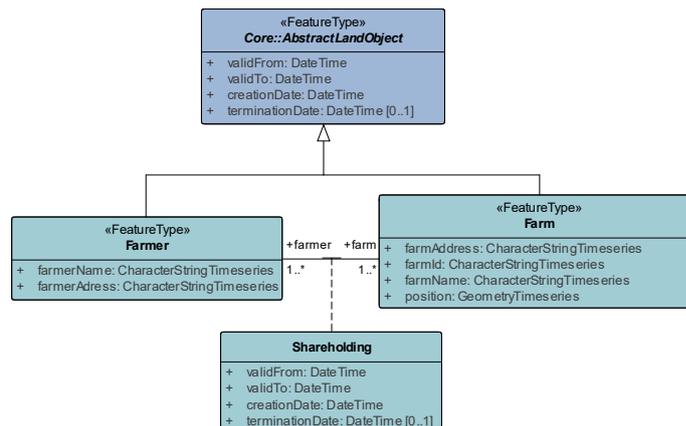
Als komplexer Datentyp beinhaltet dieser Angaben zum Maßnahmencode (Attribut *aemCode*), zur Art (Attribut *aemType*), zum Umfang (Attribut *aemScope*), zur Einheit (Attribut *aemUnit*) sowie zur geometrischen Ausdehnung der Maßnahme (Attribut *geometry*). Die zulässigen Wertebelegungen sind als erweiterbare *CodeLists* *AEMCode*, *AEMType* und *AEMUnit* im Modell abgebildet.

Die bestehende Aggregationshierarchie zwischen den verschiedenen, im Modell abgebildeten Arten landwirtschaftlicher Bezugspartellen ist im semantischen Modell in Form von Aggregationsbeziehungen explizit abgebildet. Da diese Beziehungen einer zeitlichen Veränderung unterliegen können, erfolgt die Abbildung dieser Assoziationen in Form der Assoziationsklassen *FarmerBlockIsPartOfPhysicalBlock* bzw. *AgriculturalParcelsPartOfFarmerBlock* mit Attributen zur Modellierung der zeitlichen Gültigkeit der jeweiligen Beziehung in der physischen Realität (Attribute *validFrom* und *validTo*) bzw. innerhalb des Datenbestandes (Attribute *creationDate* und *terminationDate*).

4.5.3 Modul Farming

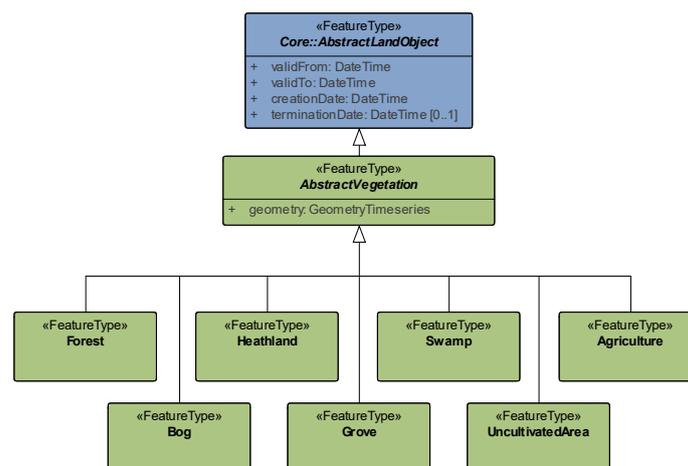
Das Modul *Farming* beinhaltet Klassen, Attribute und Beziehungen zur Modellierung landwirtschaftlicher Betriebe bzw. Betriebsinhaber. Als Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des *Core*-Moduls bildet die Klasse *Farm* landwirtschaftliche Betriebe ab. Die Klasse verfügt neben Angaben zu Name (Attribut *farmName*), Adresse (Attribut *farmAddress*) und Betriebsnummer (Attribut *farmId*) auch über eine punktförmige oder flächenhafte Geometrie zur Verortung eines Betriebs (Attribut *position*). Sämtliche Attribute dieser Klasse sind als Zeitreihenattribute ausgelegt.

Einzelne Betriebe können von mehreren beteiligten Landwirten/Teilhabern bewirtschaftet werden und verfügen daher über eine Aggregationsbeziehung zur Klasse *Farmer*, die sich ebenfalls aus *AbstractLandObject* des *Core*-Pakets ableitet. Diese Form der Abbildung ist beispielsweise für die Abbildung von Gesellschaften bzw. Genossenschaften von Relevanz. Da die Beziehung zwischen einzelnen Landwirten und landwirtschaftlichen Betrieben bzw. Unternehmen eine zeitlich begrenzte Gültigkeit aufweisen kann, ist diese Verbindung als Assoziationsklasse *Shareholding* mit Attributen zur Abbildung der Gültigkeit einer Beziehung in der physischen Realität (Attribute *validFrom* und *validTo*) wie auch innerhalb des Datenbestandes (Attribute *creationDate* und *terminationDate*) im Modell abgebildet.

Abbildung 11: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets Farming

4.5.4 Modul Vegetation

Im Modul *Vegetation* sind die notwendigen Klassen zur Abbildung der von Vegetation bedeckten Landoberfläche modelliert. Abbildung 12 gibt einen Überblick der im Paket abgebildeten Klassen.

Abbildung 12: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets Vegetation

Als Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des Kernmoduls erbt die abstrakte Klasse *AbstractVegetation* sämtliche Attribute und Assoziationen der Elternklasse. Einziges Attribut der abstrakten Klasse *AbstractVegetation* ist die flächenhafte Geometrie (Attribut *geometry*) vom Typ *GeometryTimeseries*. Die im Paket abgebildeten Objektarten orientieren sich an der semantischen Untergliederung der *Tatsächlichen Nutzung* (TN) entsprechend der AAA[®]-Modellierung. Als Klassen sind Waldflächen (Klasse *Forest*), Moorflächen (Klasse *Bog*), Heideflächen (Klasse *HeathLand*), Gehölz (Klasse *Grove*), Sumpfbereiche (Klasse *Swamp*), unkultivierte Flächen (Klasse *UncultivatedArea*) sowie Landwirtschaft (Klasse *Agriculture*) im Modell abgebildet. Grund für die zusätzliche Abbildung der Landwirtschaft in diesem Paket ist die Tatsache, dass somit auch die landwirtschaftliche Flächennutzung, die nicht Bestandteil des Pakets *AgriculturalLandUse* ist, im Modell abbildbar ist.

4.5.5 Modul SurfaceWater

Das Paket *SurfaceWater* enthält die zur flächenhaften Abbildung von Oberflächengewässern benötigten Klassen. Wie im UML-Klassendiagramm in Abbildung 13 dargestellt, bildet die abstrakte Klasse *AbstractSurfaceWater* eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des *Core*-Moduls und erbt damit sämtliche Attribute und Beziehungen ihrer Superklasse. Mit dem Attribut *geometry* enthält die abstrakte Klasse *AbstractSurfaceWater* eine Zeitreihe der flächenhaften Ausdehnung vom Typ *GeometryTimeseries*.

Fließgewässer (Klasse *StreamingWater*) und stehende Gewässer (Klasse *StandingWater*) bilden instanziierebare Kindklassen der abstrakten Klasse *AbstractSurfaceWater*. Die getroffene, semantische Untergliederung orientiert sich an der Modellierung der *Tatsächlichen Nutzung (TN)* des AAA[®] Modells.

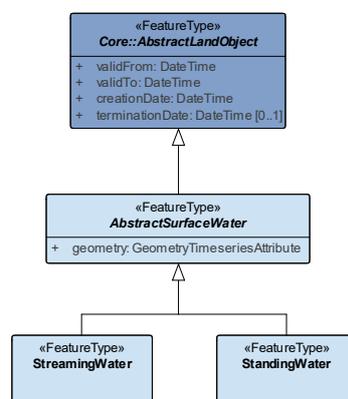
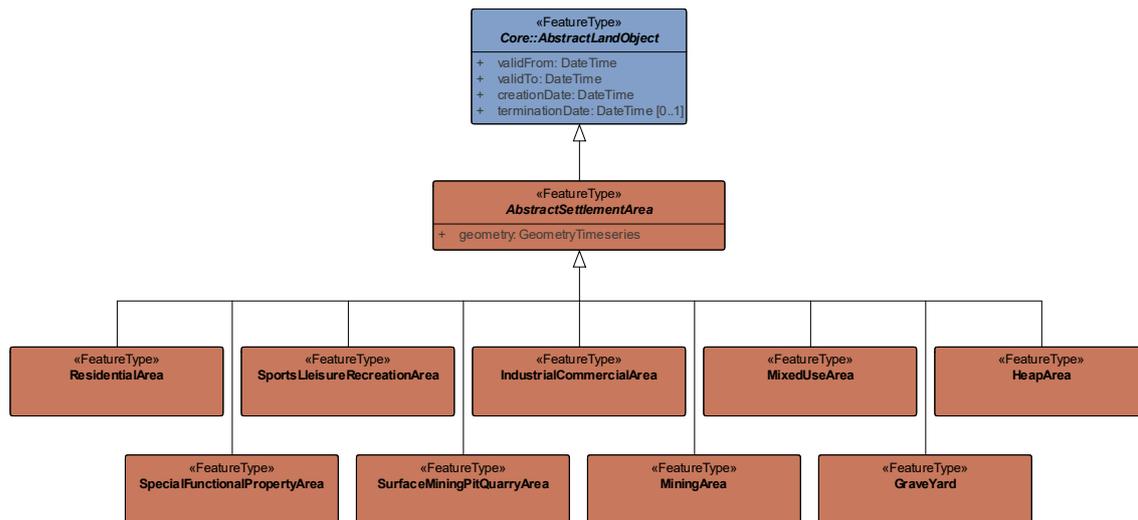


Abbildung 13: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets *SurfaceWater*

4.5.6 Modul SettlementArea

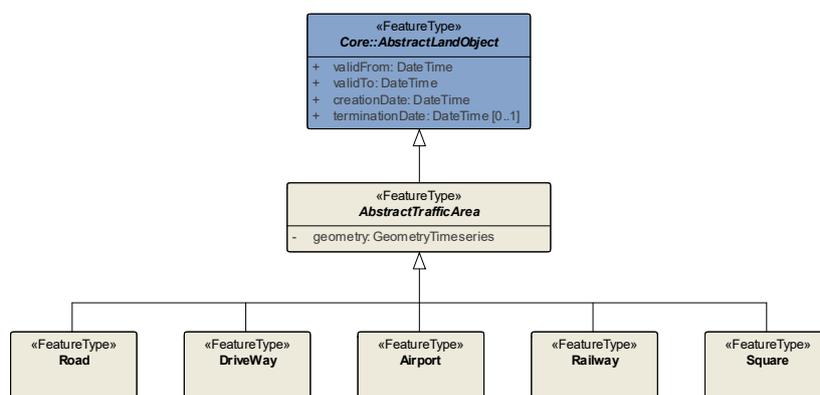
Im Paket *SettlementArea* finden sich die zur Abbildung von Siedlungs- und Industrieflächen erforderlichen Klassen und Attribute. Die abstrakte Klasse *AbstractSettlementArea* leitet sich aus der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* ab und erbt sämtliche Attribute und Beziehungen der aus dem *Core*-Modul stammenden Elternklasse. Einziges Attribut der abstrakten Klasse *AbstractSettlementArea* ist die flächenhafte Ausdehnung (Attribut *geometry*) vom Typ *GeometryTimeseries*.

Als instanziierebare Spezialisierungen sind im Paket Wohngebiete (Klasse *ResidentialArea*), Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen (Klasse *SportsLeisureRecreationArea*), Industrie- und Gewerbeflächen (Klasse *IndustrialCommercialArea*), Flächen gemischter Nutzung (Klasse *MixedUseArea*), Halden (Klasse *HeapArea*), Fläche besonderer funktionaler Prägung (Klasse *SpecialFunctionalProperty*), Tagebau und Bergbaugebiete (Klasse *SurfaceMiningPitQuarryArea* bzw. *MiningArea*) und Friedhofsflächen (Klasse *GraveYard*) abgebildet. Die semantische Differenzierung folgt auch hier der Modellierung der *Tatsächlichen Nutzung TN* des AAA[®]-Modells.

Abbildung 14: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets SettlementArea

4.5.7 Modul TrafficArea

Das in Abbildung 15 dargestellte UML-Klassendiagramm des Pakets *TrafficArea* beinhaltet die zur Abbildung von Verkehrsflächen nötigen Objektarten. Hierbei behandelt das Paket ausschließlich Objekte, welche eine flächenhafte Ausdehnung besitzen. Die abstrakte Klasse *AbstractTrafficArea* leitet sich aus der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des *Core*-Moduls ab und ist gleichzeitig Elternklasse der Objektarten zur Abbildung von Straßen (Klasse *Road*), Wegen (Klasse *DriveWay*), Flughäfen (Klasse *Airport*), Bahnstrecken (Klasse *RailWay*) und Plätzen (Klasse *Square*). Damit folgt die semantische Differenzierung auch hier der AAA[®]-Modellierung.

Abbildung 15: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets TrafficArea

4.5.8 Modul LandConsolidation

Im Paket *LandConsolidation* sind die für das Projekt LandModell^{TUM} relevanten Klassen zur Abbildung von Verfahrensgebieten der Ländlichen Entwicklung enthalten. Sowohl Flurstücke (Klasse *CadastralParcel*) als auch die Verfahrensgebiete (Klasse *LandConsolidationArea*) sind im Modell als Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* abgebildet,

wodurch diese sämtliche Attribute und Beziehungen der aus dem *Core*-Paket stammenden Basisklasse erben. Da Flurstücke über einen gewissen Zeitraum Bestandteil eines Verfahrensgebiets sein können, ist die bestehende Aggregationsbeziehung in Form der Beziehungsklasse *TemporalMembership* mit Attributen zur Abbildung des Gültigkeitszeitintervalls in der Realwelt (Attribute *validFrom* und *validTo*) bzw. innerhalb des Datenbestands (Attribute *creationDate* und *terminationDate*) abgebildet.

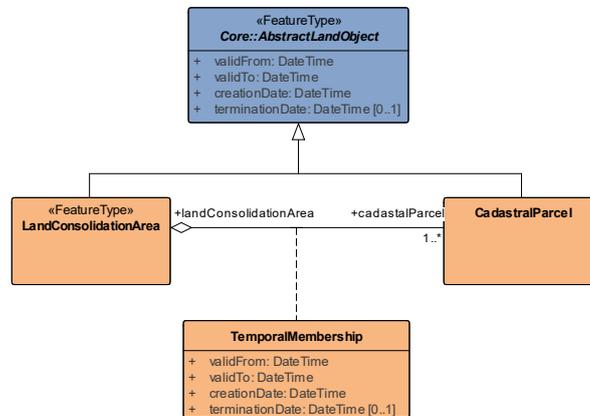


Abbildung 16: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets LandConsolidation

4.5.9 Modul StatisticalAggregationUnit

Das Modul beschreibt räumliche Aggregationseinheiten, die für die statistische Beschreibung verschiedener Merkmale genutzt werden. Neben administrativen Gebietseinheiten (z.B. Regierungsbezirke, Landkreise, Gemeinden, Gemarkungen etc.) umfasst das Modul auch Klassen zur Abbildung künstlich generierter Gebietseinheiten wie Rasterzellen verschiedener Kantenlänge. Abbildung 17 zeigt die im Paket modellierten Klassen. Die abstrakte Klasse *AbstractStatisticalAggregationUnit* ist eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* und besitzt die Kindklassen *AbstractGeographicalGridCell* und *AdministrativeUnit*. Als Kindklassen von *AbstractGeographicalGridCell* sind Aggregationsraster mit Kantenlänge von 1 000 m, 2 500 m, 5 000 m und 10000 m abgebildet. Die Klasse *AdministrativeUnit* beschreibt administrative Gebietseinheiten wie sie beispielsweise auch im ATKIS[®]-Modell enthalten sind.

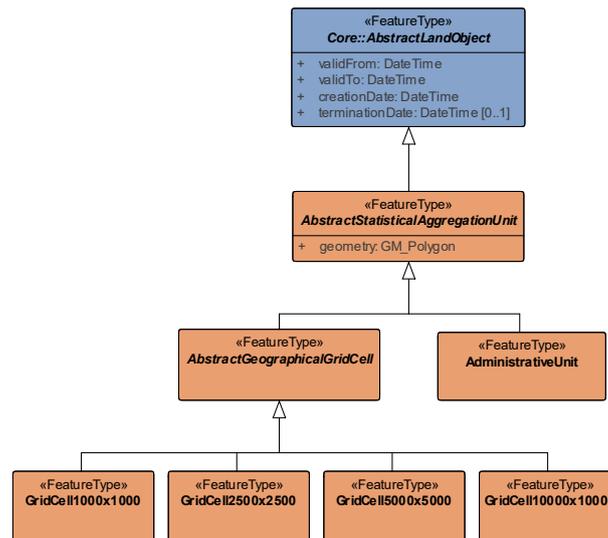


Abbildung 17: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets Statistical-AggregationUnit

4.5.10 Modul Generics

Das Modul *Generics* beschreibt Konzepte zur Erweiterung des LandModell^{TUM}. Die Modellierung folgt dabei dem in CityGML praktizierten Ansatz. So sieht das Paket einerseits eine Erweiterungsmöglichkeit um zusätzliche Objektklassen und andererseits die Ergänzung bestehender bzw. ergänzter Objektklassen um zusätzliche Attribute vor. Die Klasse *GenericLandObject* leitet sich aus der Basisklasse *AbstractLandObject* ab und ermöglicht ein Hinzufügen zusätzlicher Objektarten. Zur Ergänzung der im Modell abgebildeten Objektarten um zusätzliche Attribute dient die Klasse *GenericAttribute*, welche eine Abbildung zusätzlicher Attribute und Attributzeitreihen ermöglicht.

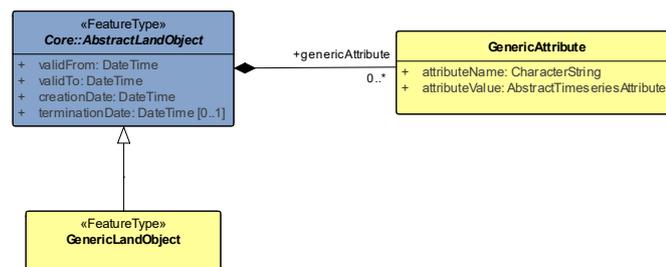


Abbildung 18: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets Generics

4.5.11 Modul LandObjectGroup

Konzepte zur Abbildung von Objektgruppen des LandModell^{TUM} sind im Paket *AbstractLandObjectGroup* enthalten ((Abbildung 19). Die Ausgestaltung erfolgt in Anlehnung an das Vorgehen im internationalen CityGML-Standard. Eine Gruppe von Objekten des LandModell^{TUM} (Klasse) stellt eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* dar und setzt sich aus Kindelementen derselben zusammen. Die Aggregationsbeziehung ist aufgrund der unter Umständen begrenzten zeitlichen Gültigkeit als Assoziationsklasse *IsPartOf* abgebildet. Diese enthält Angaben zur zeitlichen Gültigkeit der Aggregati-

onsbeziehung in der Realwelt (Attribute *validFrom* und *validTo*) sowie innerhalb des Datenbestandes (Attribute *creationDate* und *terminationDate*).

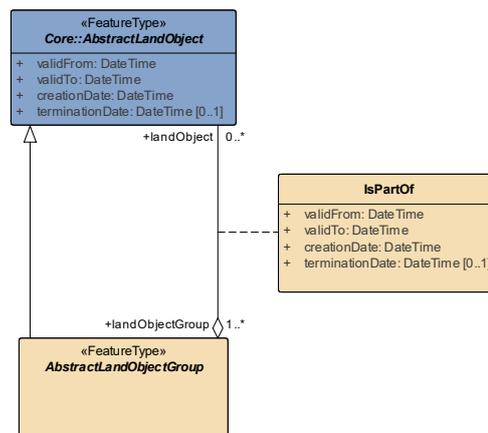


Abbildung 19: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets LandObjectGroup

4.5.12 Modul AgriculturalTransportation

Das Paket *AgriculturalTransportation* beinhaltet die zur Abbildung von Transportpfaden und -beziehungen in der Landwirtschaft sowie die zur Modellierung des Verkehrswegenetzes erforderlichen Klassen. Da die Modellierung für den Leser ein detaillierteres Verständnis des gewählten Ansatzes zur Abbildung von Transportpfaden voraussetzt, findet sich die Darstellung des Pakets nach Erläuterung der notwendigen Grundlagen im Abschnitt 8.3.2.

4.5.13 Modul AgriculturalParcelShapeDescription

Im Paket *AgriculturalParcelShapeDescription* sind die zur parametrischen Beschreibung der Parzellenform nötigen Klassen abgebildet. Die Erläuterung des Paketinhalts setzt ein Verständnis der Analysemethoden voraus. Eine ausführliche Darstellung des Paketinhalts findet sich daher in Abschnitt 7.3.3.

4.6 Diskussion des Informationsmodells

Das Informationsmodell beschreibt als zunächst anwendungsneutrales Abbild der Kulturlandschaft grundlegende Komponenten, welche für verschiedene Akteure innerhalb der Kulturlandschaft von Relevanz sind. Durch die klare semantische Definition von Objekten und Attributen sowie der Konformität zu Normen der ISO 191xx Serie bietet dieses Informationsmodell eine belastbare, formal beschriebene und maschineninterpretierbare Grundlage für die Entwicklung komplexer Werkzeuge zur intensiven Analyse der Kulturlandschaft und ihrer raumzeitlichen Entwicklung. Dabei versteht sich das semantische Modell als Plattform zur Fusion fachdisziplinenübergreifender Information über den gemeinsamen Bezug von Information auf identische Objekte. In dieser Hinsicht ergeben sich Analogien zum internationalen OGC[®]-Standard CityGML. Aus diesem Grund werden auch erfolgreiche Konzepte

von CityGML wie der modulare Aufbau, die Erweiterbarkeit, das Konzept der geometrisch-semantischen Kohärenz, die Bildung komplexer Objekte durch Aggregation, das Konzept der Kopplung der semantischen Datenmodells mit komplexen Analysemethoden verbunden mit dem Konzept der semantischen Anreicherung des Datenmodells sowie die Möglichkeit der Ausbildung von Referenzen auf externe Objekte bei der Modellierung aufgegriffen und bei der Konzeption des LandModell^{TUM} berücksichtigt. Grundlegende Unterschiede zu CityGML sowie auch zu anderen bereits bestehenden Informationsmodellen wie AAA[®], INSPIRE oder LEFIS bestehen einerseits hinsichtlich der semantischen Ausgestaltung und Tiefe sowie andererseits insbesondere im Hinblick auf die umfassende Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Fortentwicklung von Geoobjekten. Die genannten Informationsmodelle sehen in ihrer derzeitigen Form lediglich einfache Versionierungskonzepte vor, welche zumeist lediglich eine Abbildung von Objektlebensdauern bzw. teils eine Abbildung von Versionen eines Objekts vorsehen. Übergangsbeziehungen zwischen Objekten sowie auch Zustandsveränderungen sind nicht explizit abgebildet und damit auch nicht unmittelbar für weiterführende Analysen zugänglich.

Im LandModell^{TUM} ist die Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Weiterentwicklung von Geoobjekten bereits im Kern des Modells umfassend verankert: Neben der Abbildung von Objektlebensdauern sieht das Modell zudem eine explizite Abbildung von objektübergreifenden Übergangsbeziehungen in Form einer Graphstruktur sowie die Versionierung von Objektzustandsveränderungen über eine Historisierung von Attributen vor. Das entwickelte Konzept zur expliziten Abbildung von zeitlichen, objektübergreifenden Übergangsbeziehungen in Form einer Graphstruktur ermöglicht eine detaillierte und semantisch wie geometrisch kleinteilige Beschreibung von Übergängen. Der in dieser Arbeit beschriebene Ansatz betrachtet dabei Übergangsbeziehungen zwischen untergehenden und entstehenden Objekten als Summe von Einzelschicksalen betroffener Objektbestandteile. Damit unterscheidet sich das Konzept des LandModell^{TUM} von bestehenden Ansätzen wie beispielsweise denen von Del Mondo et al. (2013, 2010), Wilcox et al. (2000) oder Yuan (1999). Diese in der Literatur beschriebenen Ansätze betrachten entweder ausschließlich Einzelschicksale von Geometriefragmenten nicht aber die Übergänge zwischen den semantischen Objekten oder nehmen ausschließlich objektübergreifende Übergangsbeziehungen ohne die betreffenden Geometriefragmente in Betracht, weshalb eine umfassende semantische Beschreibung der Übergangsbeziehungen nur bedingt und nicht in der erforderlichen Tiefe möglich ist. Der im LandModell^{TUM} verfolgte Ansatz ermöglicht eine umfassende semantische Beschreibung der Reallokation von Geometriefragmenten.

Das in dieser Arbeit beschriebene Konzept der Versionierung von Objektzuständen in Form einer Historisierung von Attributwertbelegungen unterscheidet sich von klassischen Ansätzen bestehender Geoinformationssysteme. Diese sehen - sofern eine Abbildung der zeitlichen Entwicklung überhaupt vorgesehen ist - zumeist lediglich eine Modellierung der Objektlebensdauer oder - im Falle einer Versionierung von Objekten - eine Historisierung von vollständigen Objektkopien einschließlich sämtlicher Attribute eines Objekts vor (vgl. beispielsweise AAA[®]-Modellierung). Bei dieser Form der Modellierung ist der unmittelbare Zugriff auf Zeitreihen von Attributwertbelegungen einzelner Objekte nicht oder nur indirekt möglich. Das vorgestellte Konzept der Historisierung von Objektzuständen über eine Versionierung der Attributzustände hingegen ermöglicht eine redundanzfreie Modellierung historischer Objektzustände und erlaubt einen unmittelbaren Zugriff auf Attributzeitreihen für einzelne Objekte. Die beschriebene Herangehensweise greift dabei den u.a. in Peuquet (2005) skizzierten Ansatz der Untergliederung eines Geoobjekts in eine versionierbare, räumliche und nicht-räumliche sowie eine das Objekt selbst betreffende zeitliche Komponente auf. Zur Abbildung von Attributzeitreihen sind im semantischen Modell Konzepte zur Beschreibung der temporalen Ausdehnung von Attributen sowie zur Abbildung von Attributzeitreihen enthalten.

Ein Objektzustand ergibt sich dabei aus der Gültigkeit eines Objekts und den Zuständen der Attribute zum betrachteten Zeitpunkt. Im Hinblick auf die Nutzung des Modells als Plattform zur Fusion interdisziplinärer Information über den Bezug auf identische Objekte ermöglicht der Ansatz eine einfache Anreicherung von Elementen der Kulturlandschaft um zusätzliche Attributzeitreihen. Da der Ansatz keine Versionierung der Objekte selbst vorsieht, lassen sich zusätzliche Attributzeitreihen verschiedener Fachdisziplinen einfach mit den Objekten verknüpfen. Das Konzept der Attributierung von Attributen könnte sich künftig auch für eine attributscharfe Abbildung von Metainformation einsetzen lassen. Den als eigenständige Klassen abgebildeten Attributen wären hierzu lediglich zusätzliche Felder zuzuordnen.

5 Implementierung des LandModell^{TUM} als Informationssystem

Angesichts der Kompatibilität mit unterschiedlichsten Werkzeugen und Softwarekomponenten aus dem Bereich der Geoinformatik sowie insbesondere aufgrund der umfassenden Verfügbarkeit von Geofunktionalitäten wird das semantische Modell mit Hilfe des objektorientierten DBMS PostgreSQL/PostGIS als Informationssystem implementiert. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben zunächst die zur Implementierung des Informationssystems genutzte Hard- und Software. Es folgt eine Darstellung der mit der Implementierung des objektorientierten Informationsmodells im relationalen Schema des DBMS verbundenen Forschungsfragen. Nach einer Erläuterung der zur Abbildung genutzten Regeln werden die für den Aufbau des Monitoringsystems genutzten Datensätze und -quellen vorgestellt. Die Erläuterung der Datenintegrationsprozesse ist Gegenstand des Abschnitts 6. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion des gewählten Vorgehens zur Abbildung des Informationsmodells auf das objektorientierte Datenbanksystem.

5.1 Genutzte Hard- und Software

Die zur Implementierung des LandModell^{TUM} genutzte Hard- und Software soll in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

5.1.1 Genutzte Hardware

Die Implementierung des Informationssystems sowie auch die Durchführung der Analysen erfolgt auf einem Arbeitsplatzrechner mit folgender Hardwareausstattung:

	Tabelle 1: Technische Daten der genutzten Hardware
Prozessor:	Intel [®] Xeon [®] CPU E5-2660 v2 Grundtaktfrequenz: 2.20 GHz Kerne: 10 Threads: 20
Arbeitsspeicher:	128 GB
Festplatte:	1 TB SSD
Betriebssystem:	Linux Ubuntu 18.04

5.1.2 Verwendete Software

Für die Implementierung des Informationssystems sowie für die Integration und Analyse der Daten kommen verschiedene Softwarekomponenten zum Einsatz, die in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden. Neben dem Datenbankmanagementsystem *PostgreSQL* einschließlich notwendiger Erweiterungen kommt insbesondere der *ETL*-Software *FME* sowie der Software *R-Project* eine wichtige Rolle zu.

5.1.2.1 Datenbankmanagementsystem PostgreSQL mit Erweiterungen PostGIS, pgRouting und plr

Die Implementierung des Informationssystems erfolgt im Wesentlichen mit Hilfe des objekt-relationalen DBMS PostgreSQL (www.postgresql.org). Das freie und quelloffene DBMS entspricht weitestgehend den Vorgaben des SQL-Standards ISO/IEC 9075:2011 und verfügt über zahlreiche Erweiterungsmöglichkeiten (PostgreSQL Global Development Group o.D.). Zur Implementierung des Informationssystems werden folgende Erweiterungen eingesetzt:

- **PostGIS:** Die Erweiterung *PostGIS* (postgis.net) ermöglicht die Speicherung und die Verarbeitung geografischer Objekte sowie die Durchführung räumlicher Abfragen innerhalb von *PostgreSQL*.
- **pgRouting:** Mit Hilfe der Erweiterung *pgRouting* ist es möglich, topologische Analysen und insbesondere Routing-Analysen datenbankseitig durchführen zu können. *pgRouting* ergänzt *PostgreSQL/PostGIS* um entsprechende Funktionalitäten.
- **PL/R:** Das Extension *PL/R* stellt eine Spracherweiterung für *PostgreSQL*-Datenbanken dar, welche es ermöglicht, Funktionalitäten der Programmiersprache *R-Project* (siehe Abschnitt 5.1.2.3) für die Verarbeitung von Daten innerhalb des Datenbanksystem einsetzen zu können. Mögliche Anwendungen ergeben sich beispielsweise im Rahmen der statistischen Aggregation und Beschreibung von der im Datenbanksystem abgebildeten Information. Das DBMS *PostgreSQL* selbst stellt im Basisumfang nur wenige Funktionalitäten für die statistische Beschreibung von Information bereit.

5.1.2.2 Feature Manipulation Engine (FME)

Bei der Software *Feature Manipulation Engine* (FME) des kanadischen Unternehmens *Safe Software* handelt es sich um eine sog. *Spatial ETL-Software* zur Extraktion, Transformation und Speicherung (engl. *Extract-Transform-Load*) räumlicher und nicht-räumlicher Datensätze. Das Einlesen und Schreiben von Geodaten aus bzw. in unterschiedliche Datenformate erfolgt innerhalb der Software über sog. *Reader* bzw. *Writer*. Zur Verarbeitung und Transformation von Daten dienen sog. *Transformer*, die jeweils kleinteilige Verarbeitungsschritte in sich kapseln. Durch eine Kombination von *Transformern* ist es möglich, umfassende *Geoverarbeitungsketten* visuell zu konfigurieren. Diese *Geoverarbeitungsketten* werden als sog. *Workspaces* bezeichnet.

5.1.2.3 R-Project

Bei der Programmiersprache *R-Project* handelt es sich um eine freie Interpretersprache, welche insbesondere für die statistische Aufbereitung von Daten sowie für die Erzeugung statistischer Grafiken eingesetzt wird. Der Funktionsumfang lässt sich über zusätzliche Pakete erweitern. So dient beispielsweise das Paket *alluvial* zur Erzeugung von Diagrammen des zeitlichen Übergangs zwischen verschiedenen Landnutzungsformen. Über die *PostgreSQL*-Erweiterung *PL/R* (siehe Abschnitt 5.1.2.1) ist es möglich, R-Skripte als Funktion innerhalb des Datenbanksystems auszuführen.

5.2 Forschungsfragen

Die Abbildung des objektorientierten Informationsmodells auf die objektrelationale Struktur des DBMS ist mit einer Reihe von Fragestellungen verbunden. Hierzu zählen:

1. Wie lässt sich bei der Implementierung des Informationssystems hinsichtlich Struktur und Semantik eine möglichst hohe Kohärenz zwischen dem objektorientierten Informationsmodell und dem relationalen Schema des Datenbanksystems erreichen?
2. Wie ist das Datenbanksystem auszugestalten, um ein höchstmögliches Maß an Interpretierbarkeit durch die Nutzer zu erzielen?
3. Anhand welcher Abbildungsregeln lassen sich die objektorientierten Modellierungskonzepte des Informationsmodells im relationalen Schema nachbilden?
4. Welche Konzepte des objektorientierten Informationsmodells lassen sich unmittelbar im objektrelationalen DBMS übernehmen?
5. Wie ist das Informationssystem auszugestalten, um beim Zugriff auf die abgebildeten Inhalte eine möglichst hohe Performanz zu erreichen?

5.3 Regeln zur Abbildung des Informationsmodells auf das Datenbankschema

Dieser Abschnitt fasst die Regeln zur Überführung des objektorientierten Informationsmodells auf die objektrelationale Datenbankstruktur des Informationssystems zusammen. Die Darstellung der Abbildungsregeln beschränkt sich dabei auf ausgewählte UML Konzepte des Modells, die zunächst im Kontext des LandModell^{TUM} von Bedeutung sind. Hinsichtlich des grundlegenden Aufbaus und der bestehenden Hierarchien folgt die Ableitung des logischen, objektrelationalen Datenbankschemas vollständig der Struktur des konzeptuellen Datenmodells. So weit möglich werden objektorientierte Konzepte wie beispielsweise die Vererbung im Datenbanksystem umgesetzt. Die Abbildung des objektorientierten Informationsmodells auf das objektrelationale Datenbankschema erfolgt manuell. Die folgenden Abschnitte beschreiben die dafür verwendeten Abbildungsregeln für Pakete, Objektklassen, Attribute sowie für Beziehungen und Beziehungsklassen.

5.3.1 Abbildung von Paketen

Pakete werden im objektrationalen Datenbanksystem als Schemata abgebildet. Thematisch zusammenhängende Elemente werden so im Datenbanksystem gruppiert. Der Name des jeweiligen Schemas entspricht dem Paketnamen des UML-Diagramms. Die datenbankseitige Erzeugung eines Schemas ist beispielhaft anhand der Erstellung des *Core*-Schemas in SQL-Ausdruck 1 dargestellt.

```
1 CREATE SCHEMA "Core";
```

Listing 1: SQL-Ausdruck zur Erzeugung des Schemas Core

5.3.2 Abbildung von Klassen, Vererbungen und einfachen Attributen

Die in den einzelnen Paketen enthaltenen Klassen sind im logischen Modell als Tabellen im entsprechenden Schema abgebildet. Die Namen der Tabellen sind dabei identisch mit den Namen der jeweils abgebildeten Klasse. Im logischen Modell werden sowohl abstrakte wie auch nicht abstrakte Klassen als Tabellen abgebildet. Listing 2 zeigt die Erzeugung der Tabelle *AbstractLandObject* zur Abbildung der abstrakten Elternklasse aller thematischen Klassen des LandModell^{TUM}. Diese Tabelle wird später keine eigenen Instanzen enthalten, allerdings erben - analog dem semantischen Modell - die thematischen Tabellen Eigenschaften dieser Elterntabelle (vgl. Listing 3 bzw. Listing 4). Alle im logischen Modell abgebildeten Tabellen, welche eine Klasse des semantischen Modells repräsentieren, sind als Spezialisierung dieser Elterntabelle modelliert.

Die in den Klassen modellierten Attribute werden - sofern diese nicht zeitlich veränderliche Attributwerte aufweisen (siehe hierzu Abschnitt 5.3.3) - in Form von Spalten der jeweiligen Tabelle mit entsprechenden Datentypen abgebildet. So enthält die Tabelle *AbstractLandObject* neben einem global eindeutigen Objektidentifikator (Spalte *oid*) entsprechend dem Konzept der bitemporalen Datenhaltung mit den Spalten *creationDate* und *terminationDate* bzw. *validFrom* und *validTo* auch Angaben zur Lebensdauer eines Objekts im Datenbestand bzw. in der physischen Realität. Konsistenzsichernde Prüfungen werden in Form von *Prüf-Constraints* im logischen Modell berücksichtigt. Im gezeigten Beispiel betrifft dies einerseits die Erzeugung eines Primärschlüssels (Zeilen 8 und 9), sowie die Prüfung der Plausibilität der Gültigkeitszeitintervalle (Zeilen 10 bis 13).

```
1 CREATE TABLE "Core"."AbstractLandObject"  
2 (  
3     oid character varying NOT NULL,  
4     "creationDate" date,  
5     "terminationDate" date,  
6     "validFrom" date,  
7     "validTo" date,  
8     CONSTRAINT "pk_AbstractLandObject"  
9         PRIMARY KEY (oid),  
10    CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"  
11        CHECK ("terminationDate" > "creationDate"),  
12    CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"  
13        CHECK ("validTo" > "validFrom")  
14 );
```

Listing 2: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle Core.AbstractLandObject

Die Listings 2, 3 und 4 veranschaulichen die Abbildung der Vererbung auf Ebene des logischen Datenmodells beispielhaft anhand der Vererbungshierarchie zwischen den Tabellen *AbstractLandObject*, *AbstractAgriculturalPlot* und *AgriculturalParcel*.

```

1 CREATE TABLE "AgriculturalLandUse"."AbstractAgriculturalPlot"
2 (
3   -- inherited from table "Core"."AbstractLandObject": oid character varying NOT NULL,
4   -- inherited from table "Core"."AbstractLandObject": "creationDate" date,
5   -- inherited from table "Core"."AbstractLandObject": "terminationDate" date,
6   -- inherited from table "Core"."AbstractLandObject": "validFrom" date,
7   -- inherited from table "Core"."AbstractLandObject": "validTo" date
8   CONSTRAINT "pk_AbstractAgriculturalPlot"
9     PRIMARY KEY (oid),
10  CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"
11    CHECK ("terminationDate" > "creationDate"),
12  CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"
13    CHECK ("validTo" > "validFrom")
14 )
15 INHERITS ("Core"."AbstractLandObject");

```

Listing 3: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle *AgriculturalLandUse.AbstractAgriculturalPlot* als Kindtabelle der Tabelle *Core.AbstractLandObject*

```

1 CREATE TABLE "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel"
2 (
3   -- inherited from table "AgriculturalLandUse".
4   -- "AbstractAgriculturalPlot": "creationDate" date,
5   -- inherited from table "AgriculturalLandUse".
6   -- "AbstractAgriculturalPlot": "terminationDate" date,
7   -- inherited from table "AgriculturalLandUse".
8   -- "AbstractAgriculturalPlot": oid character varying NOT NULL,
9   -- inherited from table "AgriculturalLandUse".
10  -- "AbstractAgriculturalPlot": "validFrom" date,
11  -- inherited from table "AgriculturalLandUse".
12  -- "AbstractAgriculturalPlot": "validTo" date,
13  CONSTRAINT "pk_AgriculturalParcel"
14    PRIMARY KEY (oid),
15  CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"
16    CHECK ("terminationDate" > "creationDate"),
17  CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"
18    CHECK ("validTo" > "validFrom")
19 )
20 INHERITS ("AgriculturalLandUse"."AbstractAgriculturalPlot")

```

Listing 4: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle *AgriculturalLandUse.AgriculturalParcel* als Kindtabelle der Tabelle *AgriculturalLandUse.AbstractAgriculturalPlot*

Neben den von den Elterntabellen geerbten Attributen zur bitemporalen Modellierung der Objektlebensdauer sowie zur eindeutigen Identifizierung von Objekten verfügen die beiden hier gezeigten Tabellen über keine weiteren eigenen Attribute. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es sich bei den Attributen dieser Elemente gemäß dem zugrundeliegenden semantischen Modell um zeitlich variable Attributwerte handelt. Die Modellierung derartiger Attribute ist Inhalt des nun folgenden Abschnitts 5.3.3.

5.3.3 Abbildung komplexer Zeitreihenattribute

Attribute mit zeitlich veränderlicher Attributwertbelegung sind im logischen Modell für jede Objektart und für jedes Attribut als eigenständige Tabellen innerhalb des jeweiligen Schemas abgebildet, in dem sich auch die Objektartentabelle befindet. Der Name der jeweiligen Tabelle setzt sich aus dem klein geschriebenen Namen der Tabelle und dem Namen des abgebildeten Attributs zusammen. Die einzelnen Bestandteile des komplexen Datentyps zur

Abbildung von Zeitreihen sind als Spalten der entsprechenden Tabelle abgebildet. Listing 5 zeigt den SQL-Ausdruck für die Erzeugung der Elterntabelle aller Zeitreihenattribute innerhalb des Informationssystems.

Neben einem datenbankweit eindeutigen Identifikator verfügt jede der Tabellen mit Attributzeitreihen entsprechend dem semantischen Modell mit den Attributen *creationDate* und *terminationDate* bzw. *validFrom* und *validTo* über Angaben zur zeitlichen Gültigkeit eines Attributwerts innerhalb des Datenbestands bzw. der physischen Realität (bitemporale Datenhaltung). Der Bezug des jeweiligen Attributzustandes zum betreffenden Objekt ist in Form eines Fremdschlüsselverweises auf den Primärschlüssel des jeweiligen Bezugsobjekts realisiert (Spalte *id_ReferenceObject*).

```

1 CREATE TABLE "Core"."AbstractTemporalAttribute"
2 (
3     oid character varying NOT NULL,
4     "creationDate" date,
5     "terminationDate" date,
6     "validFrom" date,
7     "validTo" date,
8     "id_ReferenceObject" character varying,
9     CONSTRAINT "pk_TemporalAttribute"
10    PRIMARY KEY (oid),
11    CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"
12    CHECK ("terminationDate" >= "creationDate"),
13    CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"
14    CHECK ("validTo" > "validFrom")
15 );

```

Listing 5: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle Core.AbstractTemporalAttribute

Jedes Zeitreihenattribut einer Klasse ist im logischen Modell aus Gründen der besseren Verständlichkeit als jeweils eigene Tabelle modelliert. Listing 6 zeigt dies beispielhaft anhand der Abbildung des Attributs *crop* der Klasse *AgriculturalParcel*, welche im logischen Modell als Tabelle *agriculturalParcel_crop* repräsentiert ist.

```

1 CREATE TABLE "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_crop"
2 (
3     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": oid character varying NOT NULL,
4     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": "creationDate" date,
5     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": "terminationDate" date,
6     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": "validFrom" date,
7     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": "validTo" date,
8     -- inherited from table "Core"."AbstractTemporalAttribute": "id_ReferenceObject":
9     character varying,
10    "cropCode" character varying,
11    "cropName" character varying,
12    "cropType" character varying,
13    "cropArea" double precision,
14    "cropAreaUnit" character varying,
15    "cropGrasslandStatus" character varying,
16    CONSTRAINT "pk_AgriculturalParcel_crop"
17    PRIMARY KEY (oid),
18    CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"
19    CHECK ("terminationDate" >= "creationDate"),
20    CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"
21    CHECK ("validTo" > "validFrom"),
22    CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel"
23    FOREIGN KEY ("id_ReferenceObject")
24    REFERENCES "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" (oid)
25    ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE
26 )
27 INHERITS ("Core"."AbstractTemporalAttribute");

```

Listing 6: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Attributtabelle AgriculturalLandUse.agriculturalParcel_crop

Entsprechend dem semantischen Modell entspricht diese Tabelle einer Spezialisierung der Tabelle *AbstractTemporalAttribute* und erbt daher die Eigenschaften der Elterntabelle. Die zusätzlichen Eigenschaften des Zeitreihenattributs sind als Spalten der Tabelle realisiert. Zur Wahrung der referentiellen Integrität verfügen alle Kindtabellen der Tabelle *AbstractTemporalAttribute* über Fremdschlüssel-Constraints auf den Objektidentifikator des jeweils betreffenden Objekts (in diesem Fall auf Objekte der Tabelle *AgriculturalParcel*). Ein Löschen des Objekts führt dabei zum Löschen der referenzierenden Attributeinträge.

5.3.4 Abbildung von Assoziationen und Assoziationsklassen

Gemäß dem semantischen Modell besitzen sämtliche Assoziationen zwischen den Objektarten eine zeitlich begrenzte Gültigkeit und sind deshalb als Assoziationsklassen mit entsprechenden Attributen zur Abbildung der Gültigkeitszeitintervalle modelliert. Im logischen Modell sind diese Beziehungsklassen als Zwischentabelle mit Fremdschlüsselverweisen auf die in Beziehung zu setzenden Tabellen modelliert. Zusätzliche Eigenschaften der Beziehung sind als Spalte mit entsprechendem Datentyp abgebildet. Listing 7 zeigt das Prinzip beispielhaft anhand des SQL-Ausdrucks zur Erzeugung der Tabelle *Management_AgriculturalParcel*, welche eine zeitlich begrenzte Beziehung zwischen Tupeln der Tabelle *AgriculturalParcel* und Tupeln der Tabelle *Farm* herstellt. Neben einem eindeutigen Identifikator (Spalte *oid*) und Verweisen auf die betreffenden, in Beziehung stehenden Tabellen (Spalten *id_agriculturalParcel* und *id_Farm*) verfügt die Tabelle über Spalten zur Abbildung der zeitlichen Gültigkeit der Beziehung innerhalb des Datenbestandes bzw. der physischen Realität (Spalten *creationDate* und *terminationDate* bzw. *validFrom* und *validTo*) sowie über ein zusätzliches Attribut zur Benennung der Beziehung (Spalte *managementName*). Zur Absicherung der Konsistenz bzw. der referentiellen Integrität werden Prüf- und Fremd- bzw. Fremdschlüssel-Constraints eingeführt (Zeilen 10 bis 23). Das Löschen eines Eintrags in der referenzierten Tabelle führt dabei automatisch zur Löschung des hierauf verweisenden Eintrags in der Zwischentabelle.

```

1 CREATE TABLE "AgriculturalLandUse"."Management_AgriculturalParcel"
2 ( oid character varying NOT NULL,
3   "creationDate" date,
4   "terminationDate" date,
5   "validFrom" date,
6   "validTo" date,
7   id_farm character varying,
8   "id_agriculturalParcel" character varying,
9   "managementName" character varying,
10  CONSTRAINT "pk_ManagementAgriculturalParcel"
11     PRIMARY KEY (oid),
12  CONSTRAINT "fk_Farm"
13     FOREIGN KEY (id_farm)
14     REFERENCES "Farming"."Farm" (oid)
15     ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE
16  CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel"
17     FOREIGN KEY ("id_agriculturalParcel")
18     REFERENCES "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" (oid)
19     ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE,
20  CONSTRAINT "check_terminationDateGreaterThanCreationDate"
21     CHECK ("terminationDate" >= "creationDate"),
22  CONSTRAINT "check_validToGreaterThanValidFrom"
23     CHECK ("validTo" > "validFrom")
24 );
```

Listing 7: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle *AgriculturalLandUse.Management_AgriculturalParcel* zur Abbildung von Assoziationsklassen

Zeitliche Übergänge zwischen Objekten des LandModell^{TUM} sind im *Core*-Paket des semantischen Modells als Kante eines Graphen abgebildet, welche die Übergangsbeziehungen zwischen Objekten (= Knoten des Graphen) herstellen. Im logischen Modell ist diese Beziehung für jede abgebildete Objektart als eigene Tabelle modelliert, so dass eine entsprechende Tabelle jeweils für eine Objektart eine Beziehung der Objekte über die Zeit herstellt. Listing 8 verdeutlicht das gewählte Vorgehen beispielhaft anhand der Zwischentabelle *TemporalEdge_AgriculturalParcel*, welche die zeitlichen Übergänge zwischen Objekten des Typs/der Tabelle *AgriculturalParcel* im logischen Modell repräsentiert. Die Tabelle enthält neben Angaben zum Zeitpunkt (Spalte *changeDate*), der betreffenden Geometrie eines Geometriefragments (Spalte *geometry*) und der Art (Spalte *typeOfChange*) des zeitlichen Übergangs zwischen Objekten einer Art auch Verweise zur Abbildung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen auf Objektebene (Spalten *id_predecessor* und *id_successor*) sowie auf Ebene von Geometriezuständen (Spalten *id_predecessorGeometry* und *id_successorGeometry*). In der Tabelle sind zudem die Einzelschicksale von Geometriefragmenten über das Attribut *partDestiny* beschrieben. Die referentielle Integrität ist dabei über Fremdschlüssel-Constraints abgesichert. Dabei kaskadiert das Löschen eines der referenzierten Einträge automatisch auch auf die Einträge der Zwischentabelle.

```

1 CREATE TABLE "AgriculturalLandUse"."TemporalEdge_AgriculturalParcel"
2 ( oid character varying NOT NULL,
3   "changeDate" date,
4   id_predecessor character varying,
5   id_successor character varying,
6   "id_predecessorGeometry" character varying,
7   "id_successorGeometry" character varying,
8   "typeOfChange" character varying,
9   "partDestiny" character varying,
10  geometry geometry(Geometry,31468),
11  "creationDate" date,
12  "terminationDate" date,
13  CONSTRAINT "pk_TemporalEdgeAgriculturalParcel"
14    PRIMARY KEY (oid),
15  CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel_predecessor"
16    FOREIGN KEY (id_predecessor)
17    REFERENCES "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" (oid)
18    ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE,
19  CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel_predecessorGeometry"
20    FOREIGN KEY ("id_predecessorGeometry")
21    REFERENCES "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_geometry" (oid)
22    ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE,
23  CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel_successor"
24    FOREIGN KEY (id_successor)
25    REFERENCES "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" (oid)
26    ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE,
27  CONSTRAINT "fk_AgriculturalParcel_successorGeometry"
28    FOREIGN KEY ("id_successorGeometry")
29    REFERENCES "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_geometry" (oid)
30    ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE
31 );
```

Listing 8: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Tabelle *AgriculturalLandUse.TemporalEdge_AgriculturalParcel* für die Abbildung der Übergangsbeziehungen zwischen Objekten des Typs *AgriculturalParcel*

5.4 Genutzte Datengrundlagen für den Aufbau des LandModell^{TUM}-Informationssystems

Zur Implementierung des raumzeitlichen Informationssystems werden (Geo-)Daten aus verschiedenen Quellen und über einen Zeitraum von mehreren Jahren herangezogen. Neben mehrjährigen Daten der amtlichen Vermessung - hier sind insbesondere landesweit verfügbare Daten des ALKIS[®] und ATKIS[®] zu nennen - dienen insbesondere landesweit über mehrere Jahre vorliegende Geodaten des InVeKoS bzw. LPIS als Grundlage für den Aufbau des LandModell^{TUM}-Informationssystems. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick der genutzten Datensätze und -quellen.

5.4.1 Datengrundlagen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung

Die Geodaten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung entstammen den Datenbanken des InVeKoS bzw. LPIS des *Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten* (BayStMELF). Diese für den Zeitraum von 2010 bis 2018 in jährlichen Zeitscheiben bayernweit vorliegenden Auszüge der Produktivdatenbanken des BayStMELF geben für jedes Jahr den Zustand zum Stichtag 15. Mai wieder. Die bereitgestellten Auszüge umfassen folgende Objektarten:

- **Feldstücke:** Der Datensatz zu Feldstücken enthält neben dem eindeutigen Flächenidentifikator, der Geometrie und dem Namen von Feldstücken auch Angaben zur jeweiligen Gefährdung durch Wind- und Wassererosion. Darüber hinaus verfügen die Feldstücke über Verweise auf die jeweils bewirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe. Eine Zeitscheibe umfasst knapp 1,9 Mio. Einträge.
- **Schläge:** Der Datensatz zu Schlägen liefert neben Angaben zur Kulturen (Nutzungscode und flächenmäßiger Umfang der Kultur) auch Informationen zur Zugehörigkeit der Parzellen zu landwirtschaftlichen Betrieben sowie zu Feldstücken. Pro Jahr umfasst der Datensatz rund 2,0 Mio. Schläge.

Da Objekte vom Typ Schlag in den InVeKoS-Datenbanken des BayStMELF erst seit dem Jahr 2015 flächendeckend über eine eigenständige Geometrie verfügen, wird die Geometrie eines Schlagobjekt mit der Geometrie des jeweiligen Feldstücks gleichgesetzt, wenn sich auf einem Feldstück in einem Jahr lediglich eine Kulturart befindet und gleichzeitig die für den Schlag angegebene Fläche der Fläche des jeweiligen Feldstückspolygons entspricht.

- **Agrarumweltmaßnahmen:** Im Datensatz zu Agrarumweltmaßnahmen sind neben Angaben zu Art und Umfang der jeweiligen Maßnahme auch Verweise auf die betreffenden Schläge sowie auf die zuständigen landwirtschaftlichen Betriebe enthalten. Der Datensatz enthält pro Jahr zwischen 1,0 und 1,6 Mio. Einträge.
- **Adressdaten landwirtschaftlicher Betriebe:** Die Adressdaten zu landwirtschaftlichen Betrieben verfügen neben einem eindeutigen Identifikator lediglich über Angaben zur Adresse eines landwirtschaftlichen Betriebs bzw. Antragstellers. Der Datensatz umfasst rund 115000 Einträge.

Die Geodaten zu landwirtschaftlichen Parzellen weisen gemäß Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 eine mindestens dem Maßstab 1:10 000 bzw. ab dem Jahr 2016 eine mindestens dem Maßstab 1:5 000 entsprechende Genauigkeit auf.

5.4.2 Datengrundlagen zu Verkehrswegen

Grundlage für die Berechnung von Transportpfaden (siehe Kapitel 8, 9 und 10) bilden Verkehrsachsen des Basis-DLM des LDBV. Die verwendeten Objektarten zur bayernweiten Abbildung von Verkehrswegen entstammen den ATKIS[®]-Objektartengruppen *Verkehr* bzw. *Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen für den Verkehr* und umfassen folgende Anzahl an Elementen:

- *AX_Strassenachse* (Objektart 42003) mit ca. 1,6 Mio. Objekten je Zeitscheibe
- *AX_Fahrbahnachse* (Objektart 42005) mit ca. 0,2 Mio. Objekten je Zeitscheibe
- *AX_Fahrtwegachse* (Objektart 42008) mit ca. 1,4 Mio. Objekten je Zeitscheibe
- *AX_WegPfadSteig* (Objektart 53003) mit ca. 0,2 Mio. Objekten je Zeitscheibe

Die Elemente bilden über die einzelnen Objektarten hinweg ein geometrisches Liniennetzwerk und verfügen durch identische Start- und Endkoordinaten der Linienzüge über eine implizite Netztopologie (AdV 2014), welche sich durch Ableitung von Inzidenz- bzw. Adjazenbeziehungen in eine Graphstruktur bestehend aus Knoten und Kanten überführen lässt. Grundlage der genutzten Daten ist die *Topographische Karte* (TK) im Maßstab 1:25000. Nach AdV (2014) bewegt sich die geometrische Lagegenauigkeit der Straßenobjekte in einem Bereich von ± 3 m sowie für Segmente des land- und forstwirtschaftlichen Wegenetzes ± 15 m.

Die einzelnen Objektarten besitzen umfangreiche Attribute zur Beschreibung unterschiedlichster Eigenschaften einzelner Elemente. So finden sich in den Datensätzen neben Angaben zur Widmung einzelner Straßensegmente beispielsweise auch detaillierte Informationen zum Ausbauzustand einzelner Wege des land- und forstwirtschaftlichen Wirtschafts- bzw. Hauptwirtschaftswegenetzes. Eine umfassende Übersicht der enthaltenen Attribute findet sich in AdV (2008) bzw. BKG (2013)

5.4.3 Datengrundlage zu Amtlichen Hauskoordinaten

Die Geokodierung der Adressen landwirtschaftlicher Betriebe erfolgt auf Grundlage amtlicher *Hauskoordinaten* des LDBV. Eine Zeitscheibe dieses Datenbestandes umfasst rund 3,5 Mio. Einträge mit jeweils 18 Attributen. Neben verschiedenen Identifikatoren, Angaben zur Qualität der georeferenzierten Gebäudeadresse und Schlüsseln zur Zuordnung von Adressen zu administrativen Einheiten enthält der Datensatz insbesondere Adressdaten in Form von Straßennamen, Hausnummern, Adressierungszusätzen, Postleitzahlen, postalischen Ortsnamen und postalischen Ortsteilen. Die Verortung der Adressen erfolgt über Koordinatenangaben als Rechts- und Hochwerte. Eine detaillierte Zusammenstellung der im Datensatz abgebildeten Attribute sowie weiterführende Erläuterungen zum Datensatz finden sich in LDBV (2017).

5.4.4 Datengrundlagen zu Flurstücken

Die ebenfalls für den Zeitraum von 2010 bis 2018 bayernweit in jährlichen Zeitscheiben vorliegenden Geodaten zu *Flurstücken* entstammen der *Digitalen Flurkarte* (DFK) bzw. dem ALKIS[®]. Die Datensätze enthalten neben der Geometrie der Flurstücke auch einen eindeutigen Objektidentifikator sowie den Flurstückszähler und -nenner. Darüber hinaus geben die Daten Auskunft über die amtliche Fläche, den Bayerischen Gemarkungsschlüssel, den Amtlichen Gemeindegemeinschaftsschlüssel sowie über die Lagebezeichnungen der Flurstücke. Die Daten werden vom LDBV bereitgestellt. Für Details zu den genutzten Datensätzen sei auf die Technische Dokumentation des LDBV verwiesen (LDBV 2016). Im Projekt werden Auszüge der DFK zu folgenden Stichtagen verwendet:

- Stichtag 2013: 13.05.2013
- Stichtag 2014: 14.05.2014
- Stichtag 2015: 06.05.2015
- Stichtag 2016: 17.05.2016
- Stichtag 2017: 26.05.2017
- Stichtag 2018: 23.05.2018

Eine Zeitscheibe umfasst rund 10,6 Mio. Flurstücke.

5.4.5 Datengrundlagen zur Tatsächlichen Nutzung der Erdoberfläche

Als zusätzliche Datengrundlage zur Abbildung der Kulturlandschaft dienen in jährlichen Zeitscheiben vorliegende Geodaten der *Tatsächlichen Nutzung* (TN) für den Zeitraum von 2014 bis 2018 (Datenquelle: LDBV). Die Datensätze entstammen dem ALKIS[®] bzw. sind aus diesem abgeleitet und entsprechen dem Erfassungsmaßstab der DFK (LDBV 2012, 2018). Die Geodaten repräsentieren eine flächendeckende, überschneidungsfreie und lückenlose Beschreibung der Erdoberfläche und untergliedern sich in insgesamt 25 Objektarten, welche in vier Objektartengruppen aufgeteilt sind (LDBV 2018). Die einzelnen Objektarten verfügen über zahlreiche Attribute zur Beschreibung der Nutzung des jeweiligen Ausschnitts der Erdoberfläche. Eine detaillierte Zusammenstellung der abgebildeten Objektarten und deren Attribute findet sich in LDBV (2012) sowie in LDBV (2018).

Die für das Projekt genutzten Geodaten der *Tatsächlichen Nutzung* (TN) entsprechen jährlichen Schnappschüssen, die für das jeweilige Jahr den Zustand etwa Mitte Mai repräsentieren. Als Zeitscheiben werden folgende Schnappschüsse genutzt:

- Stichtag 2014: 14.05.2014
- Stichtag 2015: 06.05.2015
- Stichtag 2016: 17.05.2016
- Stichtag 2017: 26.05.2017
- Stichtag 2018: 26.05.2018

Die Zeitscheibe eines Jahres umfasst jeweils etwa folgende Anzahl an Objekten:

- 0,4 Mio. Elemente der Objektartengruppe *Gewässer*
- 1,4 Mio. Elemente der Objektartengruppe *Siedlung*
- 3,2 Mio. Elemente der Objektartengruppe *Vegetation* und
- 1,4 Mio. Elemente der Objektartengruppe *Verkehr*.

5.5 Diskussion des logischen Datenmodells

Die Abbildung des objektorientierten Informationsmodells auf die objektrelationale Struktur des datenbankbasierten Informationssystems erfolgt in einer Weise, welche die Struktur und Semantik in einer nutzerinterpretierbaren Form aufrechterhält. So werden Pakete, Klassen, Attribute, Assoziationen bzw. Assoziationsklassen sowie auch Aggregations- und Kompositionsbeziehungen entsprechend des semantischen Modells in Schemata, Tabellen, Spalten oder in Form von Fremdschlüsselverweisen (einschließlich konsistenzsichernder Constraints) abgebildet. Zudem sind auch objektorientierte Elemente wie Vererbung im Datenbanksystem modelliert. Für die Modellierung der Attributzeitreihen ist für jedes Attribut einer Klasse eine eigene Tabelle vorgesehen, welche durch die jeweilige Bezeichnung die Semantik der abgebildeten Einträge aufrechterhält. Diese Form der Abbildung bedingt eine relativ hohe Zahl an Tabellen (eine Tabelle je Objektart zzgl. einer Tabelle je darin modellierter Attributzeitreihe), erleichtert jedoch für den Nutzer aufgrund der in der Bezeichnung vorhandenen Semantik die Übersichtlichkeit und auch die Interpretierbarkeit der jeweils enthaltenen Information. Die Abbildung orientiert sich vollständig an klar definierten Abbildungsregeln. In jeder der Tabellen mit Angaben zu Attributzeitreihen bzw. zeitlich begrenzt gültigen Beziehungen zwischen Tabellen ist die zeitliche Ausdehnung von Attributzuständen entsprechend des bitemporalen Datenhaltungsansatzes in Form des Gültigkeitszeitintervalls in der Realwelt und innerhalb des Datenbestandes abgebildet. Über eindeutige Identifikatoren ist jeder Eintrag der Tabellen mit Attributzeitreihen individuell adressierbar.

Zur Rekonstruktion des Zustands eines Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt sind die Objekte mit den Attributzuständen zu verknüpfen. Diese Verknüpfung ist im Informationssystem für die einzelnen Objektarten jeweils als Datenbanksicht abgebildet (siehe hierzu auch Abschnitt 6.5.2). Die Objektzustände zum gesuchten Zeitpunkt sind in den Sichten in einer flachen Struktur abgebildet, so dass sie unmittelbar mit gängigen GI-Systemen zu visualisieren und weiterzuverarbeiten sind. In den Sichten sind neben den Sachinformationen zusätzlich auch die Identifikatoren der Attributzustände enthalten, so dass diese unmittelbar adressierbar sind. Aussagen zur erzielbaren Performanz beim Zugriffs auf Objektzustände sind dem Abschnitt 6 zu entnehmen.

Innerhalb des Informationssystems ist die Abbildung von Objektlebensdauern, Übergangsbeziehungen zwischen Objekten sowie auch die Historisierung von Objektzuständen über die Versionierung einzelner Attribute für sämtliche flächenhaften Objekte umgesetzt. Hierunter fallen die Themenbereiche *landwirtschaftliche Flächennutzung, Agrarumweltmaßnahmen, Flurstücke, Vegetation, Oberflächengewässer, Siedlung* sowie *Verkehrsflächen*.

Teil II

LandAnalyticsToolkit^{TUM}

Ein grundlegendes Konzept des LandModell^{TUM} besteht in der Kopplung des Modells mit Werkzeugen des LandAnalyticsToolkit^{TUM}, welche jeweils verschiedene Aspekte der Kulturlandschaft beleuchten. Dieses Prinzip ist schematisch in Abbildung 20 veranschaulicht. Die Werkzeuge des LandAnalyticsToolkit^{TUM} greifen auf die im LandModell^{TUM} abgebildeten Elemente zu, verarbeiten diese und reichern die jeweils betreffenden Objekte um die Ergebnisse der Analysen an. Damit stehen die Ergebnisse der durchgeführten Analysen auf Ebene von Einzelobjekten für aufbauende Analysen sowie für eine integrierte Betrachtung verschiedener Phänomene zur Verfügung. Die Abbildung der Ergebnisse erfolgt kleinteilig und in Form von Verweisen auf die beteiligten Objekte des LandModell^{TUM}. Diese Form der Abbildung bietet für weiterführende Analysen ein sehr hohes Maß an Flexibilität.

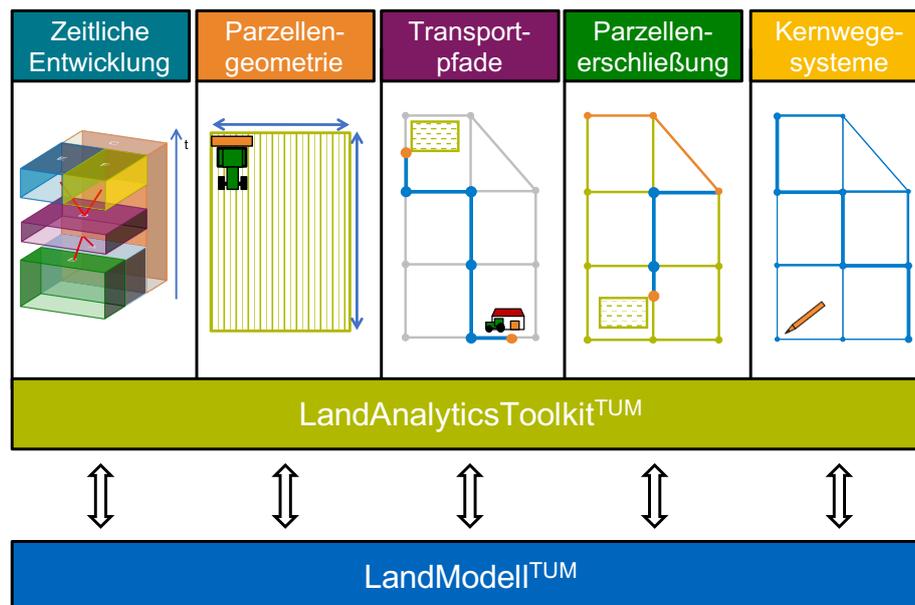


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Kopplung von LandModell^{TUM} und komplexen Analysemethoden des LandAnalyticsToolkit^{TUM}

In der vorliegenden Arbeit werden insgesamt fünf Analysewerkzeuge konzipiert und implementiert. Diese Werkzeuge des LandAnalyticsToolkit^{TUM} behandeln:

1. die Erkennung, Dokumentation und Analyse von Veränderungen einzelner Landschaftskomponenten über die Zeit,
2. die parametrische Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen,
3. die Analyse von Hof-Feld-Transportrouten in der Landwirtschaft,
4. die Untersuchung der Verkehrsanbindung landwirtschaftlicher Parzellen sowie
5. die Bereitstellung objektiver Planungsgrundlagen für die Konzeption interkommunaler Kernwegesysteme für die Landwirtschaft.

Gemeinsam mit grundlegenden Ergebnissen der durchgeführten Analysen werden die Werkzeuge in den folgenden Abschnitten vorgestellt. In den einzelnen Kapiteln werden nach einer kurzen Einführung verwandte Arbeiten und der jeweilige Stand des Wissens vorgestellt. Anschließend werden Forschungsfragen aufgeworfen und die konzeptuellen Überlegungen zu deren Beantwortung dargelegt. Auf die Darstellung grundlegender Ergebnisse folgt eine Diskussion des gewählten Vorgehens.

6 Werkzeug zur Analyse raumzeitlicher Veränderungen der Kulturlandschaft

Die Entstehung und Weiterentwicklung von Kulturlandschaften ist seit jeher unmittelbar mit einer fortlaufenden Anpassung von Landschaften an die Bedürfnisse des Menschen und die jeweiligen technologischen Gegebenheiten verbunden (stellvertretend: Haber 2016). Über lange Zeiträume hinweg entstehen so - beeinflusst von gesellschaftlichen Entwicklungen und geprägt von naturräumlichen Gegebenheiten - vielgestaltig strukturierte Kulturlandschaften, welche zumeist regionaltypische Merkmale aufweisen. Spätestens mit der umfassenden Mechanisierung und Motorisierung der Landwirtschaft Mitte des vergangenen Jahrhunderts erfährt der bis dahin eher graduell verlaufende Wandel der Kulturlandschaft eine erkennbare Beschleunigung. Landwirtschaftliche Parzellen und damit auch die Landschaft insgesamt wurden - auch unterstützt durch Flurbereinigungsverfahren - im Hinblick auf einen effizienten Einsatz von Landmaschinen umgestaltet (stellvertretend: Haber 2016).

In der jüngeren Vergangenheit haben insbesondere strukturelle Veränderungen in der Landwirtschaft aber beispielsweise auch veränderte politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen zu einer zusätzlichen Beschleunigung und Intensivierung von Veränderungen in der Landschaft beigetragen. So kommt es beispielsweise im früheren Bundesgebiet zu einer Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe bei gleichzeitiger Zunahme der bewirtschafteten Fläche der verbleibenden Betriebe (BMEL 2020, S. 23 Tabelle 13). Diese Entwicklung erfordert den Einsatz leistungsfähiger und schlagkräftigerer Landtechnik sowie auch verschiedene weitere Rationalisierungsmaßnahmen. Die Ausschöpfung des vollen Leistungspotentials und damit auch der effiziente Einsatz der eingesetzten Maschinen stellt hinsichtlich Größe und Form veränderte Anforderungen an die bestehenden Parzellenstrukturen (siehe hierzu auch Abschnitt 7). Kleinteilige Parzellen werden zusammengelegt und Strukturelemente wie Hecken, Feldgehölze oder Feldrandstrukturen zu Gunsten größerer Bewirtschaftungseinheiten entfernt (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2015; Haber 2014). Die Zusammenlegung kleinerer Parzellen zu größeren Bewirtschaftungseinheiten ist in großen Teilen Westdeutschlands weiterhin ein deutlich zu beobachtender Trend (Zenger und Friebe 2015). Zumeist geht die Ausweitung der Parzellengrößen einher mit einem Verlust von Randstrukturen und damit häufig auch mit negativen Effekten auf die Biodiversität (Haber 2014; Kollmann 2019).

Im Zuge einer Rationalisierung in der Landwirtschaft ist ab Mitte des 20. Jahrhunderts vielfach eine Spezialisierung landwirtschaftlicher Betriebe und damit einerseits eine verstärkte Trennung zwischen Pflanzen-, Tier- und neuerdings auch Energieproduktion sowie andererseits auch eine Spezialisierung innerhalb der jeweiligen Produktionsrichtung zu beobachten (Haber 2014). Folglich lässt sich vielerorts eine Veränderung des Kulturartenspektrums und vielfach auch eine Intensivierung von Fruchtfolgen sowie eine räumliche und zeitliche Konzentration bestimmter Kulturarten in bestimmten Regionen beobachten (Haber 2014; Ringler und Frobel 2013). Entwicklungen wie diese können sich in vielerlei Hinsicht beispielsweise auf Bodenfruchtbarkeit, Nährstoffflüsse oder aber Biodiversität auswirken.

Neben strukturellen Veränderungen in der Landwirtschaft, einer zunehmenden Beanspruchung landwirtschaftlicher Nutzfläche für den Anbau von Energiepflanzen (stellvertretend: FNR 2015; Haber 2016; Hendricks 2017) ist vielfach auch die Ausweitung von Siedlungs-, Verkehrs-, Industrie- oder Gewerbeflächen - häufig zu Lasten landwirtschaftlicher Flächen - treibende Kraft für Veränderungen der Kulturlandschaft. Zielkonflikte der Flächennutzung sind Gegenstand der gesellschaftlichen Diskussion (stellvertretend seien die Beiträge in DLKG 2016, 2017 angeführt).

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einer Analyse verschiedener Facetten der zeitlichen Fortentwicklung von Elementen der Kulturlandschaft. Dabei werden Verfahren zur Erkennung und Dokumentation von Veränderungen einzelner Komponenten der Kulturlandschaft beleuchtet. Die Beschreibung von Veränderungen adressiert einerseits Zustandsveränderungen von Objekten sowie andererseits objekt- und objektartenübergreifende Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit.

6.1 Verwandte Arbeiten

Die Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzfläche für den Bau von Siedlungs-, Verkehrs- und Gewerbeflächen ist ebenso Gegenstand zahlreicher Untersuchungen wie Veränderungen der landwirtschaftlichen Betriebs- und Flächenstrukturen. In diesem Abschnitt sollen einige Arbeiten aus diesem Bereich herausgegriffen und auch einige Kennzahlen sowie die zugrundeliegenden Methoden kurz vorgestellt werden. Der Abschnitt beschäftigt sich zunächst mit dem Aspekt des Flächenverbrauchs bevor Arbeiten zur Entwicklung von Betriebs- und Flächenstrukturen über die Zeit vorgestellt werden.

6.1.1 Flächenverbrauch und Landnutzungswandel

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes liegt der durchschnittliche tägliche Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in einem gleitenden Vierjahresdurchschnitt für das Jahr 2016 in Deutschland bei einem Wert von ca. 62 ha/Tag (Statistisches Bundesamt 2018, S. 476, Tabelle 18.8.3 bzw. Umweltbundesamt 2019). Im Zeitraum von 2000 bis 2018 lässt sich für Deutschland eine Abnahme der Landwirtschaftsfläche von 17,067 Mio. ha auf 16,645 Mio. ha beobachten (BMEL 2020, S. 63, Tabelle 47). Dies entspricht einer Reduzierung der Landwirtschaftsfläche um ca. 422 000 ha. Der Rückgang tritt bei Grünland mit einer Reduzierung um 335 000 ha (2000: 5,048 Mio. ha; 2018: 4,713 Mio. ha) wesentlich deutlicher zu Tage als dies bei Ackerland mit einem Rückgang um 73 000 ha (2000: 11,804 Mio. ha; 2018: 11,731 Mio. ha) der Fall ist (BMEL 2020, S. 63, Tabelle 47). Eine Ursache hierfür dürfte insbesondere auch in einer Überführung von Grünland in Ackerland liegen.

In Bayern reduziert sich die landwirtschaftlich genutzte Fläche von 3,279 Mio. ha im Jahr 2000 auf 3,128 Mio. ha im Jahr 2017, was einem Rückgang von 151 000 ha entspricht (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019, S. 16). Auch hier ist der Rückgang der Grünlandfläche um 111 000 ha (2000: 1,169 Mio. ha; 2017: 1,058 Mio. ha) deutlich größer als der Rückgang bei Ackerland mit 35 000 ha (2000: 2,092 Mio. ha; 2017: 2,057 Mio. ha).

Die genannten Zahlen stützen sich sowohl bei der bundesweiten wie auch bei der landesweiten Betrachtung auf Zeitreihen der Flächensumme unterschiedlicher Formen der Landnutzung. Als Grundlage dienen Katasterdaten (ALKIS[®]) der Länder. Übergänge wie die

Umwandlung von Grünland in Ackerfläche (und vice versa) sowie auch die Umwandlung von nicht landwirtschaftlich genutzter Fläche in Grünland bzw. Ackerfläche (und vice versa) bleiben verborgen und sind daher lediglich implizit in der Flächenbilanz enthalten aber nicht unmittelbar zu lokalisieren.

Eine Untersuchung von Friebe (2018) analysiert den Verbrauch landwirtschaftlicher Nutzfläche zwischen den Jahren 2008 und 2017. Die Arbeit stützt sich auf Daten des LPIS bzw. des InVeKoS. Zur Ermittlung der im untersuchten Zeitraum umgenutzten landwirtschaftlichen Nutzfläche führt Friebe (2018) eine Flächenverschneidung bzw. eine Differenzbildung der LPIS-Datensätze der Jahre 2008 und 2017 durch. Dadurch ist es möglich, die abhanden gekommene landwirtschaftliche Nutzfläche zu verorten und das lokale Verschwinden bzw. die Umnutzung landwirtschaftlicher Nutzfläche sichtbar zu machen. Im betrachteten Zeitraum beträgt der Rückgang der nicht mehr im InVeKoS abgebildeten landwirtschaftlichen Nutzfläche ca. 45 575 ha, was im Mittel des Betrachtungszeitraums einer Abnahme von ca. 12,5 ha/Tag entspricht. Bei der Arbeit handelt es sich um eine einmalige Gegenüberstellung der Feldstückspolygone der Jahre 2008 und 2017. Das Ziel der Untersuchung liegt nicht in einem fortlaufenden Monitoring des Verbleibs landwirtschaftlicher Nutzfläche. Da die Arbeit lediglich zwei Zustände im Abstand von 10 Jahren vergleicht, ermöglicht der Ansatz zudem keine genauen Rückschlüsse auf den Zeitpunkt einer Überführung landwirtschaftlicher Parzellen in eine andere Form der Landnutzung.

Die Erkennung und Dokumentation von Veränderungen der Landnutzung über die Zeit ist insbesondere auch Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im Bereich der Fernerkundung (stellvertretend: Joshi et al. 2016). So liefert beispielsweise *CORINE Land Cover* (CLC) europaweit detaillierte und räumlich hochauflösende Angaben zu Veränderung der Landnutzung bzw. der Bodenbedeckung. Daten des CLC stehen für die Bezugsjahre 1990, 2000, 2006, 2012 und 2018 zur Verfügung, so dass sich daraus Veränderungen der Landnutzungs-klassen sowie auch Angaben zur tatsächlichen Versiegelung von Flächen zwischen den betrachteten Jahren ableiten lassen (stellvertretend: Fina 2011). Methoden der Fernerkundung ermöglichen im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Ansatz der Analyse von Zeitreihen der Flächensummen verschiedener Landnutzungskategorien eine detaillierte Verortung entsprechender Landnutzungsänderungen. Die Ansätze erlauben jedoch ausschließlich eine flächige Betrachtung von Veränderungen und ermöglichen daher nur eine Beschreibung sichtbarer Zustandsveränderung einzelner Objekte. Nicht zwingend mit Methoden der Fernerkundung erkennbare Veränderungen wie beispielsweise die Zusammenlegung oder Teilung landwirtschaftlicher Parzellen sowie Veränderungen von Eigentumsgrenzen (z.B. Flurstücke) bleiben unbeachtet. Damit sind Methoden der Fernerkundung nur bedingt für die in dieser Arbeit zu behandelnden Fragestellungen ausreichend.

6.1.2 Veränderungen landwirtschaftlicher Betriebs- und Parzellenstrukturen

Die Struktur landwirtschaftlicher Betriebe und Parzellen unterliegt einer fortlaufenden Veränderungen, die sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Intensität teils erheblich unterscheidet. So lässt sich für Deutschland im Zeitraum von 1999 bis 2016 eine Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe mit einer Gesamtfläche von mehr als 5 ha von 354 333 auf 251 311 beobachten (BMEL 2020, S. 24 Tabelle 13). Die Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland lässt sich insbesondere unterhalb einer Betriebsgröße von 100 ha feststellen (BMEL 2020, S. 24 Tabelle 13). Für Betriebe mit einer Gesamtfläche von mehr als 100 ha lässt sich hingegen eine Zunahme beobachten (BMEL 2020, S. 24 Tabelle 13). Verbunden mit einer Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe ist eine

Größenzunahme der verbleibenden Betriebe. So wächst die durchschnittliche Größe von Betrieben mit mehr als 5 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche im Bundesgebiet von 47,6 ha im Jahr 1999 auf 66,3 ha im Jahr 2016 (BMEL 2020, S. 24 Tabelle 13).

Hinsichtlich dieser zeitlichen Entwicklung zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den neuen und den alten Bundesländern. Während in den neuen Bundesländern die Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe mit einer Betriebsgesamtfläche von mehr als 5 ha im Zeitraum von 1999 bis 2016 mit einem Wert von ca. 22 246 im Jahr 1999 bzw. 22 468 im Jahr 2016 konstant bleibt bzw. leicht zunimmt, sinkt die Anzahl der Betriebe größer 5 ha im früheren Bundesgebiet von 332 087 im Jahr 1999 auf 228 340 im Jahr 2016 (BMEL 2020, S. 23 Tabelle 13). Auch die durchschnittliche Betriebsfläche von Betrieben mit mehr als 5 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche bleibt in den neuen Bundesländern im gleichen Zeitraum mit einem Wert von 251,1 ha im Jahr 1999 und einem Wert von 245,7 ha im Jahr 2016 auf einem konstanten bzw. leicht rückläufigem Niveau (BMEL 2020, S. 23 Tabelle 13). Im früheren Bundesgebiet steigt die durchschnittliche Betriebsgröße von Betrieben mit einer Gesamtfläche von mehr als 5 ha von 33,9 ha im Jahr 1999 auf 48,7 ha im Jahr 2016 (BMEL 2020, S. 23 Tabelle 13).

In Bayern sinkt die Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe mit einer Gesamtfläche von mehr als 5 ha von 125 945 im Jahr 1999 auf 88 200 im Jahr 2017 (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019, S. 16). Während die Anzahl von Betrieben mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von weniger als 50 ha abnimmt, steigt die Anzahl an Betrieben mit einer Gesamtgröße von mehr als 50 ha (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019, S. 16). Eine detaillierte Betrachtung der zeitlichen Entwicklung von Betriebsstrukturen in der Landwirtschaft findet sich in Zenger und Friebe (2015).

Zu den regionalen Unterschieden bestehender Parzellenstrukturen und deren zeitlicher Entwicklung finden sich in der Literatur nur sehr lückenhafte Angaben. So untersuchen beispielsweise Röder et al. (2018) auf Grundlage der Daten des InVeKoS unter anderem die Entwicklung der Parzellenstrukturen im Zeitraum von 2010 bis 2015 für die acht deutschen Bundesländer Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig Holstein. Im betrachteten Zeitraum lässt sich eine Abnahme des Anteils kleinerer Schläge beobachten. So sinkt im Beobachtungszeitraum für die betrachteten Bundesländer der Anteil von Ackerflächen mit einer Flächengröße kleiner 5 ha von 41,0 % auf 39,4 %. Für Grünlandparzellen steigt im gleichen Zeitraum der Anteil von Parzellen kleiner 2,5 ha von 36,0 % auf 37,3 %.

Eine Zunahme der Parzellengröße zeigt eine ähnliche Analyse von Zenger und Friebe (2015) auch für Bayern. So lässt sich für Ackerflächen eine Zunahme der mittleren Schlaggröße von 1,34 ha im Jahr 1996 auf 1,84 ha im Jahr 2014 beobachten. Die Analysen stützen sich ebenfalls auf Daten des InVeKoS.

Sämtliche der hier vorgestellten Untersuchungen beschränken sich auf eine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung verschiedener statistischer Lagemaße zur Anzahl und Größe landwirtschaftlicher Betriebe und Parzellen innerhalb definierter Regionen. Im Fokus der Betrachtung steht daher nicht die Entwicklung des einzelnen Betriebs bzw. der einzelnen Parzelle sondern vielmehr die Entwicklung aggregierter Kennzahlen über die Zeit. Einzelne Veränderungsereignisse, wie beispielsweise die Zusammenlegung von Parzellen, ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Entsprechend lassen sich solche Ereignisse nicht lokalisieren sondern lediglich implizit und in ihrer Gesamtheit analysieren. Eine Begleitung regionaler Umstrukturierungsprozesse ist dadurch erschwert oder gar unmöglich.

6.1.3 Zeitliche Abfolge von Kulturen auf landwirtschaftlichen Parzellen

Die zeitliche Abfolge von Kulturen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ist eine grundlegende Eingangsinformation für die Bearbeitung verschiedenster Fragestellungen der Landwirtschaft aber auch der Landschafts- bzw. Agrarökologie. Beispielhaft hierfür seien die regionale Kulturartendiversität, die Bodenerosion oder aber pflanzenbauliche Aspekte wie die Beikrautregulierung oder aber phytosanitäre Einflussfaktoren angeführt (vgl. Auerswald 2002; Diepenbrock 2016; Steinmann und Dobers 2013). Trotz der großen Relevanz der Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen für die Bearbeitung der genannten Fragestellungen finden sich in der Literatur so gut wie keine Angaben zur Fruchtfolge auf einzelnen Parzellen bzw. zu typischen regionalen Fruchtfolgen.

Aufgrund fehlender Information werden daher beispielsweise Fruchtfolgen aus den regionalen Anteilen verschiedener Kulturarten abgeleitet. So entwickelt Auerswald (2002) einen Ansatz, um für die Berechnung des langjährigen mittleren Bodenabtrags mit Hilfe der *Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung* (ABAG) den Kulturartenfaktor (sog. *C-Faktor*) aus den regionalen Fruchtartenanteilen abzuleiten. Für individuelle Parzellen ergeben sich dabei ansatzbedingt natürlich Unschärfen.

Auf Grundlage von Parzellendaten des InVeKoS entwickeln Steinmann und Dobers (2013) für Niedersachsen einen Ansatz zur Ableitung von Fruchtfolgen für Einzelparzellen im Zeitraum von 2005 bis 2010. Dabei beschränkt sich die Arbeit auf insgesamt zehn betrachtete Kulturarten. Aufgrund der zeitlichen Instabilität der in den InVeKoS-Daten enthaltenen Parzellenidentifikatoren - diese sind auch wesentliche Grundlage der Analysen - ist es im Rahmen der Untersuchungen möglich, lediglich für 184 701 der 990 000 Parzellen je betrachteter Zeitscheibe eine Abfolge von Kulturen abzuleiten. Für die Identifikation identischer Parzellen in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben spielen Geodaten keine unmittelbare Rolle. Auch beschreibt die Arbeit keinen Ansatz zur Abbildung der Abfolge von Kulturen als Eigenschaft einer landwirtschaftlichen Parzelle.

6.2 Forschungsfragen

Im Rahmen der Untersuchungen zur raumzeitlichen Veränderung der Kulturlandschaft ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen, die sich sowohl auf inhaltliche wie insbesondere auf methodische Aspekte beziehen. Beispielhaft für fachliche Fragestellungen aus den Bereichen der Agrarwissenschaften, der Landentwicklung bzw. der Umweltwissenschaften seien angeführt:

1. In welchen Regionen Bayern befinden sich Bereiche mit einer hohen räumlichen Dichte von Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen (Zusammenlegung, Flächeninanspruchnahme etc.)?
2. Wie ist die Fruchtfolge bzw. die Abfolge von Kulturen auf Einzelparzellen gestaltet?
3. In welchen Regionen findet sich eine hohe räumliche Dichte der Überführung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Siedlungs-, Verkehrs- oder Gewerbeflächen?

Diese Fragestellungen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit Fragestellungen, welche die Implementierung des Informationssystems und insbesondere die Integration der zu-

grundlegenden Daten aus heterogenen und verteilten Datenquellen betreffen. Zu diesen Fragestellungen zählen:

1. Wie lassen sich Objektlebensdauern, Zustandsveränderungen und objekt- bzw. objektartenübergreifende Veränderungen sowie zeitlich begrenzt gültige Beziehungen zwischen Objekten aus einer Sequenz aufeinanderfolgender Zeitscheiben verschiedener Datenbestände ableiten?
2. Wie lässt sich vor dem Hintergrund einer Nutzung der im LandModell^{TUM} abgebildeten Elemente als Referenzobjekte zur Fusion interdisziplinärer Information die Objektlebensdauer möglichst langfristig aufrechterhalten?
3. Wie lässt sich ein robustes Verfahren zur Extraktion identischer Objekte aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben realisieren, welches vor dem Hintergrund einer möglichst langfristigen Aufrechterhaltung der Lebensdauer von Objekten eine nutzerdefinierbare Toleranz gegenüber kleineren und für die Objektbildung irrelevanten Unterschieden zwischen Objekten aufweist?
4. Wie lassen sich Regionen mit einer hohen räumlichen Dichte bzw. Intensität von objekt- und objektartenübergreifenden Veränderungen erkennen und landesweit sichtbar machen?

6.3 Konzeptionelle Überlegungen

Die Lebensdauer einzelner Elemente der Kulturlandschaft, die objektübergreifende Übergangsbeziehungen sowie auch Zustandsveränderungen von Objekten sind für den Aufbau des LandModell^{TUM}-Informationssystems aus Sequenzen jährlicher Schnappschüsse verschiedener Datenbestände abzuleiten. Für die Extraktion identischer Objekte aus einer Abfolge von Zeitscheiben spielen Identitäten einzelner Elemente und damit auch klare Regeln zur Objektbildung eine wesentliche Rolle. Vor dem Hintergrund einer Nutzung des Informationssystems bzw. der darin abgebildeten Elemente als Plattform zur Vernetzung von Informationen verschiedener Fachbereiche über den gemeinsamen Bezug von Information auf identische Objekte kommt einer möglichst langfristigen Aufrechterhaltung von Objekten eine große Bedeutung zu. Es ist also zu definieren, bis zu welchem Grad an Unterschiedlichkeit zwei Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben als identisch anzusehen sind und ab welchem Grad an Unterschiedlichkeit Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben nicht mehr die selbe Identität besitzen.

Die folgenden Abschnitte behandeln die konzeptuellen Überlegungen zur Extraktion identischer Objekte aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben sowie auch die Erkennung, Dokumentation und Beschreibung von Veränderungen einzelner Komponenten der Kulturlandschaft. Dabei wird zunächst auf die Aspekte Objektbildung und Objektidentität eingegangen. In diesem Kontext werden Konzepte zur Aufrechterhaltung der Objektidentität sowie zur Ableitung von Objektlebensdauern und Zustandsveränderungen aus aufeinanderfolgenden Schnappschüssen erläutert. Es folgt eine Erläuterung der konzeptuellen Überlegungen zur Klassifikation und Beschreibung von objektübergreifenden Übergängen über die Zeit.

6.3.1 Objektidentität und Regeln zur Objektbildung

Um die im Informationssystem abgebildeten Elemente als Plattform zur interdisziplinären Vernetzung von Information nutzen zu können, sollten die abgebildeten Elemente nach Möglichkeit eine längerfristige zeitliche Stabilität aufweisen. Damit kommt der Objektidentität als eindeutiges Merkmal zur Identifizierung eines Objekts sowie zur Abgrenzung gegenüber anderen Objekten eine wesentliche Bedeutung zu. Die zeitliche Gültigkeit einer Objektidentität steht dabei in unmittelbarem Zusammenhang mit der Lebensdauer des betreffenden Objekts. Im Gegensatz zur Modellierung von Phänomenen, welche über eine klar abgrenzbare Lebensdauer verfügen (z.B. Gebäude, Bäume, Fahrzeuge etc.) und außerhalb ihrer Lebensdauer über keine räumliche Ausdehnung verfügen, erfordert die Abbildung von Ausschnitten der Erdoberfläche umfassendere Regeln zur Abgrenzung zwischen Objekten sowie zur Objektbildung. Hintergrund dieser Überlegung ist die Tatsache, dass jeder Ausschnitt der Erdoberfläche und damit auch jedes darin befindliche Objekt eine Vorgeschichte und eine Zukunft besitzt. In Objektbildungsregeln ist daher klar festzulegen, bis zu welchem Grad an Veränderung eines Geoobjekts dessen Lebensdauer aufrecht zu erhalten ist und ab welchem Grad der Veränderung die Lebensdauer eines Geoobjekts endet und neue Geoobjekte mit eigener Identität zu bilden sind.

Typischerweise repräsentieren Geoobjekte die für die jeweilige Betrachtung relevanten Einheiten der Realwelt. Diese lassen sich nach geometrischen, physischen und begrifflichen Aspekten klar voneinander abgrenzen (Bill 2016, S. 18/19). Die Identität eines Geoobjekts ist damit insbesondere von der Art des repräsentierten Realweltobjekts (= Zugehörigkeit zu einer Objektklasse) sowie von der jeweiligen geometrischen Ausdehnung bestimmt. Größere geometrische Umformungen sowie auch Veränderungen der Art repräsentierter Geoobjekte sind damit wesentliche Kriterien für die Entstehung bzw. den Untergang von Objekten. Während die Beibehaltung bzw. Umwandlung der Art eines Geoobjekts einfach festzustellen ist, sind vor dem Hintergrund einer möglichst langfristigen Aufrechterhaltung der Objektlebensdauer Toleranzen für den maximal zulässigen Grad der geometrischen Veränderung für eine Aufrechterhaltung der Lebensdauer von Objekten festzulegen.

Innerhalb des LandModell^{TUM} werden grundsätzlich neue Objekte mit eigener Identität gebildet, wenn

- sich die Art des repräsentierten Geoobjekts (= Klassenzugehörigkeit eines Objekts) verändert **oder**
- die Art eines Objekts unberührt bleibt **und** sich der Grad der geometrischen Umformung außerhalb des zulässigen Toleranzbereichs bewegt (siehe hierzu 6.3.2)

Entsprechend besteht die Lebensdauer eines Geoobjekts fort, sofern

- die Art eines Objekts unverändert bleibt **und**
- sich der Grad der geometrischen Umformung unterhalb des festgelegten Toleranzbereichs bewegt

Im Falle einer geometrischen Umformung eines Geoobjekts, welche sich unterhalb des zulässigen Toleranzbereichs bewegt, bleibt das Objekt bestehen und es kommt lediglich zu einer Versionierung des Geometriezustands. Die Lebensdauer des betreffenden Objekts bleibt aufrechterhalten.

6.3.2 Extraktion identischer Objekte aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben

Grundlage für den Aufbau des raumzeitlichen Informationssystems bilden Sequenzen zeitlich aufeinanderfolgender Schnappschüsse unterschiedlicher und heterogener Geodatenbestände mit unterschiedlicher thematischer Ausrichtung. Eine grundsätzliche Herausforderung dieser Arbeit besteht daher in der rückwirkenden Ableitung von Objektlebensdauern, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit aus Abfolgen von Zeitscheiben unterschiedlicher Datensätze. Dabei stehen die Objekte der einzelnen Schnappschüsse zunächst in keinerlei Beziehung zueinander, weshalb Geoobjekte, welche in unterschiedlichen Zeitscheiben das selbe Realweltobjekt repräsentieren, zunächst eigenständige Objekte darstellen. Aus den Sequenzen verschiedener Zeitscheiben sind daher zunächst identische Objekte zu extrahieren, Objektlebensdauern abzuleiten, Zustandsveränderungen zu erkennen und Übergangsbeziehungen zwischen Objekten zu erfassen und zu dokumentieren. Die Objekte der einzelnen Zeitscheiben erhalten dadurch neben der räumlichen auch eine zeitliche Ausdehnung, wodurch punktförmige Geoobjekte in raumzeitliche Linien, linienhafte Geoobjekte in raumzeitliche Flächen und flächenhafte Geoobjekte in raumzeitliche Prismen überführt werden. Abbildung 21 veranschaulicht diesen Schritt. Zustandsveränderungen in Form einer Veränderung thematischer Eigenschaften sind in der Darstellung zunächst ausgeblendet.

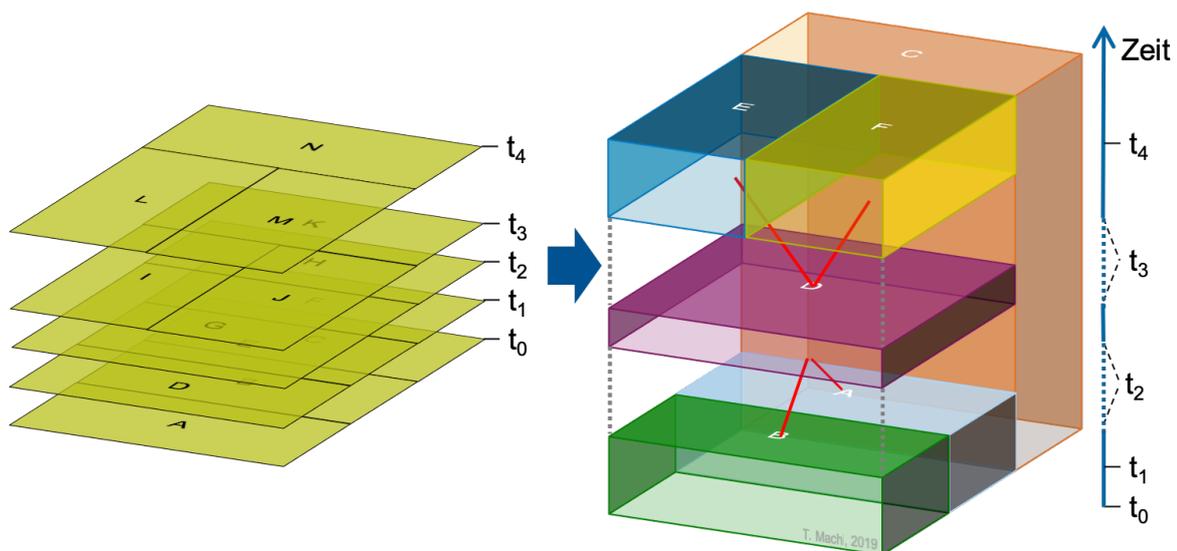


Abbildung 21: Vom Schnappschüssen (links) zu Objektlebensdauer und objektübergreifenden Veränderungen über die Zeit (rechts)

Die grundlegende Voraussetzung hierfür bildet zunächst die Erkennung identischer Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben unter besonderer Berücksichtigung der in Abschnitt 6.3.1 aufgeführten Objektbildungsregeln. Demnach gelten zwei zunächst voneinander unabhängige Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben als identisch, sofern sie der selben Art angehören und sie entweder die selbe geometrische Ausdehnung besitzen oder sich aber die geometrischen Unterschiede zwischen den Objekten unterhalb des festgelegten Toleranzbereichs bewegen. Im Gegensatz zum Abgleich der Art und der geometrischen Ausdehnung zweier Objekte, welche sich über die Klassenzugehörigkeit bzw. einen Vergleich der Stützpunkte realisieren lässt, erfordert der gegenüber geometrischen Abweichungen zwischen Geoobjekten tolerante Abgleich umfassendere Konzepte und Methoden zur Erkennung identischer Objekte.

Der für den Aufbau des LandModell^{TUM} verfolgte Ansatz setzt hierzu auf der Definition der räumlichen Beziehung „gleich“ auf. Nach OGC (2011) sind zwei Geometrieobjekte A und B räumlich gleich, wenn die Geometrie von A eine Teilmenge der Geometrie von B und die Geometrie von B gleichzeitig auch eine Teilmenge von A ist. Dies trifft dann genau dann zu, wenn Geometrie A vollständig in Geometrie B enthalten ist und umgekehrt auch Geometrie B vollständig in Geometrie A enthalten ist. Werden diese beiden Bedingungen nun um einen Toleranzbereich erweitert, so können sie für die gegenüber kleineren geometrischen Veränderungen unempfindliche Suche nach identischen Objekten in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben genutzt werden. Innerhalb des LandModell^{TUM} gelten zwei geometrisch nicht vollständig gleiche Geoobjekte A und B einer Art in zwei aufeinanderfolgenden dennoch als identisch, wenn sich die Geometrie des Objekts B vollständig innerhalb der Geometrie A zuzüglich einem Toleranzbereich und sich gleichzeitig die Geometrie des Objekts A vollständig innerhalb der Geometrie des Objekts B zuzüglich einem Toleranzbereich befindet. Die Toleranzbereiche werden dabei durch Pufferung des jeweiligen Referenzgeometrie um die Toleranz r_{Toleranz} erzeugt. Abbildung 22 verdeutlicht das gewählte Vorgehen anhand eines Beispiels. Die Geoobjekte A und B repräsentieren Elemente der selben Art zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten t_n (Objekt A) bzw. zu t_{n+1} (Objekt B). Zunächst kann geprüft werden, ob sich die Geometrie des Objekts B vollständig innerhalb der um einen Toleranzbereich (r_{Toleranz}) gepufferten Geometrie von A befindet. Liefert dieser Test ein positives Ergebnis, so kann geprüft werden, ob sich auch die Geometrie des Objekts A vollständig innerhalb der um den selben Toleranzbereich (r_{Toleranz}) gepufferten Geometrie von B befindet. Liefern beide Prüfungen ein positives Resultat, so werden die beiden Objekte als Identisch betrachtet, Objekt A zum Zeitpunkt t_n und Objekt B zum Zeitpunkt t_{n+1} repräsentieren das selbe Geoobjekt zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit verschiedenen Geometriezuständen.

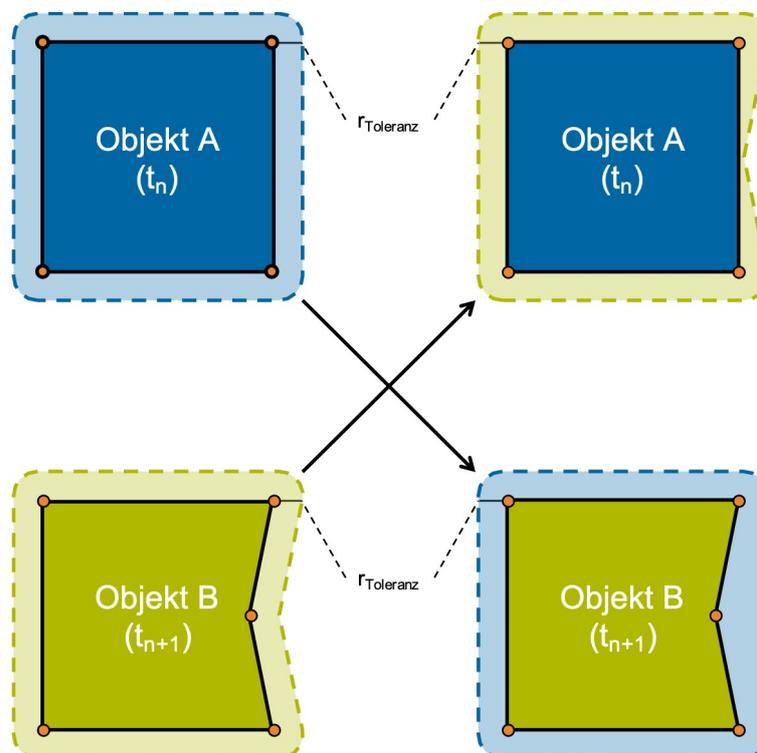


Abbildung 22: Prinzip der gegenüber für die Objektbildung irrelevanten Geometrieunterschieden toleranten Extraktion identischer Objekten aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben; r_{Toleranz} repräsentiert in der Abbildung einen geometrischen Toleranzbereich für zulässige geometrische Unterschiede zwischen als identisch zu klassifizierenden Geoobjekten

Besitzt ein flächenhaftes Geometrieobjekt eine kleinere räumliche Ausdehnung als die zulässige Toleranz - dies ist dann der Fall, wenn eine negative Pufferung eines Geoobjekts um die Hälfte des Toleranzbereichs (r_{Toleranz}) eine ungültige Geometrie zurück liefert - werden geometrisch unterschiedliche Objekte der selben Art auch als Objekte mit unterschiedlichen Identitäten betrachtet.

6.3.3 Grundlegende Annahmen zur Objektlebensdauer und zur zeitlichen Gültigkeit von Objektzuständen

Der rückwirkende Aufbau des Informationssystems aus einer chronologisch geordneten Abfolge von Schnappschüssen erfordert grundlegende Annahmen zur Objektlebensdauer sowie zur zeitlichen Gültigkeit von Objektzuständen zwischen Zeitscheiben. Da Schnappschüsse lediglich den Zustand der Realwelt zu bestimmten Zeitpunkten repräsentieren, lassen sich daraus keine unmittelbaren Rückschlüsse auf den tatsächlichen Zeitpunkt des Entstehens, des Untergangs oder der Zustandsveränderung eines Phänomens in der Realwelt ableiten (sog. *verborgene Strukturen*; vgl. Abschnitt 3.2.2).

Die erste Annahme betrifft daher den Zeitpunkt, zu dem ein Objekt entsteht, untergeht oder eine Zustandsveränderung erfährt: Vereinfachend wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Zeitpunkte des Entstehens, des Untergehens oder der Zustandsveränderung den Zeitpunkten des jeweiligen Schnappschusses entsprechen.

Die zweite Annahme betrifft den Zustand bzw. die Existenz eines Objekts im Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitscheiben: Werden in zwei aufeinanderfolgenden Zeitscheiben Objekte als identisch betrachtet, so wird davon ausgegangen, dass im Zeitraum zwischen den Schnappschüssen das jeweilige Objekt unverändert bleibt und auch die Lebensdauer des Objekts darin fortbesteht.

6.3.4 Ableitung der Objektlebensdauer und Erkennung der Zustandsveränderungen von Geoobjekten

Im Informationssystem ist zunächst der Ausgangszustand des digitalen Modells der Realwelt abzubilden. Die einzelnen Objekte und auch deren Eigenschaften verfügen dabei über eine Objektlebensdauer, welche zum Zeitpunkt des ersten Schnappschusses beginnt und eine zunächst unendliche Gültigkeit besitzt.

Für jede der zusätzlich in das Informationssystem zu integrierende Zeitscheibe hat nun ein Abgleich zwischen den bereits im Informationssystem abgebildeten und den im Schnappschuss repräsentierten Objekten bzw. Objektzuständen zu erfolgen. Hierzu sind die im Informationssystem abgebildeten Objekte und Objektzustände, welche eine über den Zeitpunkt der zu integrierenden Zeitscheibe hinausreichende Gültigkeit besitzen, den Objekten und Objektzuständen des zu integrierenden Schnappschusses gegenüber zu stellen. Dabei ist zu prüfen, ob ein Objekt der zu integrierenden Zeitscheibe bereits im Informationssystem abgebildet ist bzw. als identisch mit einem bereits bestehenden Objekt klassifiziert werden kann. Bei der Prüfung sind drei mögliche Ausgänge denkbar:

- **Ein Objekt des Schnappschusses ist als identisch mit einem bereits abgebildeten Objekt klassifizierbar:** Wird unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 6.3.1

bzw. 6.3.2 bereits erläuterten Kriterien ein Objekt des Schnappschusses als identisch mit einem bereits im Informationssystem abgebildeten Objekt erkannt, so besteht die Lebensdauer des betreffenden Objekts fort und es erfolgt in einem nächsten Schritt ein Abgleich der Objektzustände durch eine paarweise Gegenüberstellung der Attributwerte. Sind für ein Attribut Unterschiede zwischen den Versionen eines Objekts festzustellen, so endet zum Zeitpunkt des Schnappschusses die Gültigkeit des alten Attributzustands, gleichzeitig beginnt die Lebensdauer des neuen Attributzustands.

- **Ein Objekt des Schnappschusses ist als nicht identisch mit einem bereits abgebildeten Objekt klassifizierbar:** Befindet sich in der Zeitscheibe ein Objekt, welches bislang noch nicht im Informationssystem abgebildet ist, so ist ein neues Objekt zu bilden. Das neue Objekt und auch der Objektzustand (= Zustände der Attribute) besitzt eine Lebensdauer, welche mit dem Zeitpunkt des Schnappschusses beginnt und eine zunächst unendliche Gültigkeit aufweist. Der Ausgangszustand entspricht dem Zustand des Objekts im Schnappschuss.
- **Ein im Informationssystem abgebildetes Objekt findet keine Entsprechung im zu integrierenden Schnappschuss:** Enthält das Informationssystem ein Objekt, welches sich im Schnappschuss nicht wiederfinden lässt, so endet die Lebensdauer des betreffenden Objekts einschließlich der Lebensdauer seiner Attributzustände. Das Ende der Objektlebensdauer fällt dabei mit dem Zeitpunkt des Schnappschusses zusammen.

6.3.5 Klassifikation und Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit

Eine explizite Modellierung der objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen einzelnen Komponenten der Kulturlandschaft über die Zeit erfordert einerseits die Herstellung von Bezügen zwischen Objekten über die Zeit sowie andererseits eine detaillierte Analyse, Rekonstruktion und Klassifikation der Abläufe, welche sich beim zeitlichen Übergang zwischen Objekten ereignen. Für alle Objekte, deren Lebensdauer nach den in den Abschnitten 6.3.1 bzw. 6.3.2 festgelegten Regeln endet bzw. beginnt, sowie auch für Veränderungen des Geometriezustands fortbestehender Objekte sind dabei Quellen und Senken von Geometriefragmenten zu betrachten und auf dieser Grundlage Übergangsbeziehungen zu klassifizieren.

Dazu ist die Geometrie entstehender und untergehender Objekte bzw. Geometriezustände zunächst gegeneinander zu verschneiden. Aus der Gesamtheit der für Einzelfragmente beobachteten Ereignisse lassen sich anschließend verschiedene Kategorien von Übergangsbeziehungen ableiten. Da zeitliche Übergänge zwischen Geoobjekten häufig eine Vielzahl von Einzelveränderungen beinhalten ist grundsätzlich zwischen der Klassifikation von Übergangsbeziehungen auf Objektebene und den Schicksalen von Geometriefragmenten zu unterscheiden. Die Schicksale einzelner Geometriefragmente lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- **Eingliederung:** Ein Geometriefragment wird in ein neues Geoobjekte bzw. einen neuen Geometriezustand der selben Art eingliedert.
- **Abspaltung:** Ein Geometriefragment wird von bestehenden Geoobjekt abgespalten und besteht als neues Geoobjekte der selben Art fort.

- **Übergang zwischen Objektarten:** Ein Geometriefragment ist nicht mehr Bestandteil eines neuen Geoobjekts der selben Art. Entsprechend hat für diesen Teilbereich ein objektartenübergreifender Übergang stattgefunden.

Auf Grundlage dieser Betrachtung von Einzelschicksalen lässt sich anschließend eine Kategorisierung der Art einer Übergangsbeziehung zwischen Objekten einer Klasse vornehmen. Dabei lassen sich folgende grundlegende Kategorien des zeitlichen Übergangs zwischen Objekten einer Art feststellen:

- **Update der Geometrie:** Werden Geoobjekte aus zwei aufeinanderfolgenden Zeitscheiben nach dem in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Verfahren als identisch klassifiziert und besitzen die betreffenden Objekte dabei nicht die exakt identische, geometrische Ausdehnung, so ist von einem Update der Geometrie die Rede. In diesem Fall besteht die Objektlebensdauer fort, es kommt lediglich zu einer Aktualisierung des Geometriezustands. Um die geometrischen Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden Geometriezuständen eines Objekts nachvollziehen zu können und auch weiterführenden Analysen zugänglich zu machen, werden die Schicksale der einzelnen Geometriefragmente im Informationssystem dokumentiert.
- **Entstehung eines neuen Geoobjekts aus Geoobjekten einer anderen Art:** Bei der Entstehung eines vollständig neuen Geoobjekts enthält die Geometrie des betreffenden Objekts keinerlei Bestandteile eines anderen unmittelbaren Vorgängerobjekts der selben Art. Sämtliche Bestandteile der Geometrie entstammen Objekten einer anderen Objektart.
- **Vollständiger Übergang eines Geoobjekts in Geoobjekte anderer Art:** Beim vollständigen Untergang eines Geoobjekts geht kein Geometriebestandteil des untergehenden Objekts in die Geometrie eines Nachfolgerobjekts der selben Art über. Sämtliche Geometriefragmente gehen in Objekten einer anderen Objektart auf.
- **Abspaltung bzw. Teilung:** Geht ein neues Geoobjekt aus genau einem anderen Vorgängerobjekt der selben Art hervor, so wird von einer Teilung bzw. Abspaltung gesprochen. Ein Vorgängerobjekt kann dabei mehrere Nachfolgerobjekte besitzen, ein Nachfolgerobjekt darf aber nur von einem Vorgängerobjekt abstammen.
- **Zusammenlegung:** Im Falle einer Zusammenlegung besitzt ein entstehendes Geoobjekt geometrische Bestandteile von mindestens zwei Vorgängerobjekten, welche in dieses eingegliedert werden. Dabei muss mindestens ein Vorgängerobjekt von der selben Art sein wie das entstehende Geoobjekt selbst. Weitere Geometriefragmente können auch Objekten anderer Objektarten entstammen.

6.4 Implementierung der Analysewerkzeuge zur Datenintegration

Im Rahmen des LandModell^{TUM} werden Werkzeuge für die Integration von Geodaten zu landwirtschaftlichen Parzellen (Feldstücke, Schläge und Agrarumweltmaßnahmen des InVe-KoS bzw. LPIS), zur Tatsächlichen Nutzung der Erdoberfläche (Objektartengruppen Gewässer, Siedlung, Vegetation und Verkehr der TN) sowie zu Flurstücken (Daten der DFK bzw. des ALKIS[®]) implementiert. Die folgenden Abschnitte erläutern zunächst den grundlegenden Aufbau der Werkzeuge zur Datenintegration für die jeweiligen im Modell abgebildeten Objektarten bevor im weiteren Verlauf detaillierter auf die einzelnen Schritte zur Detektion

identischer Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben, zur Analyse von Zustandsveränderungen sowie auf die Erkennung und Klassifikation von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit eingegangen wird.

6.4.1 Grundlegender Aufbau der Werkzeuge zur Datenintegration

Die Integrationswerkzeuge sind für jede im Modell abgebildete Objektart bzw. Objektartengruppe als eigenständige FME-Workspaces implementiert. Für den Aufbau des Informationssystems sind die abzubildenden Zeitscheiben einer Objektart in chronologischer Reihenfolge in das System zu integrieren. Die Werkzeuge untergliedern sich im Wesentlichen in sechs Komponenten:

- 1. Einlesen und Prüfen der Eingangsdaten**
 - Laden der Daten
 - Prüfung der Eingangsdaten auf Konsistenz, Validität und Freiheit von Artefakten; Bereinigung der Daten
- 2. Laden der benötigten Objekte und Objektzustände aus dem Informationssystem**
- 3. Abgleich der Objekte und Suche nach identischen Objekten**
 - Extraktion bereits im Informationssystem abgebildeter Objekte
 - Extraktion entstehender und untergehender Objekte
- 4. Vergleich der Zustände identischer Objekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten**
- 5. Rekonstruktion und Klassifikation von Übergangsbeziehungen zwischen entstehenden und untergehenden Objekten**
- 6. Dokumentation von Veränderungsereignissen im Informationssystem**
 - Eintragung entstehender Objekte, Attributzustände und Beziehungen
 - Anpassung des Lebenszeitintervalls untergehender Objekte, Attributzustände und Beziehungen
 - semantisch kleinteilige Abbildung von Übergangsbeziehungen zwischen untergehenden und entstehenden Objekten

Die einzelnen Schritte sollen in den nachfolgenden Abschnitten dargelegt werden.

6.4.2 Prüfung der Eingangsdaten auf Validität, Bereinigung der Geometrie von Artefakten und Prüfung der Konsistenz

Alle verwendeten Geodaten werden bei der Integration in das Informationssystem grundsätzlich auf geometrische Validität geprüft. Zusätzlich werden die Geodaten zu landwirtschaftlichen Parzellen des InVeKoS hinsichtlich des Auftretens von Artefakten geprüft und ggf. von diesen bereinigt. Erfassungsbedingt enthalten die Parzellendaten des InVeKoS vereinzelt geometrische sowie geometrisch-topologische Ungenauigkeiten in Form von Artefakten, invaliden Geometriezuständen oder Überlappungen zwischen benachbarten Geoobjekten. Vor dem Hintergrund der durchzuführenden Analysen im Kontext des LandModell^{TUM} kommt der vollständigen Validität der Geometrie von Geoobjekten eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen der Datenintegration erfolgt daher eine umfassende Prüfung und - falls

erforderlich und möglich - Bereinigung von geometrischen Fehlern, Ungenauigkeiten und Artefakten.

6.4.2.1 Prüfung auf Validität der Geometrie

Die Prüfung behandelt die Validitätskriterien gemäß des OGC[®]. Für Polygone sind nach OGC (2011) insbesondere folgende Kriterien zu erfüllen und daher zu prüfen:

- topologische Geschlossenheit von Polygonumringen
- Zusammensetzung von Polygonen aus äußeren und inneren Polygonumringen
- Abwesenheit von dornartigen Fortsätzen (sog. *Spikes*), Schnittlinien sowie von isolierten Einzelpunkten
- Korrekte geometrische Anordnung der inneren und äußeren Polygonumringe
 - Überschneidungsfreiheit der Polygonumringe
 - Trennung der Außenräume von Polygonen mit Aussparungen
 - Trennung der Polygoninnenräume von Multipolygonen

Die Überprüfung der Validität erfolgt zu weiten Teilen mit Hilfe des *FME-Transformers GeometryValidator*. Soweit notwendig und möglich erfolgt eine Reparatur der Geometrie nicht oder nicht vollständig valider Geoobjekte. Für die Reparatur kommen sowohl FME-interne Reparaturalgorithmen als auch eigens entwickelte Methoden zum Einsatz. Mit FME-eigenen Reparaturalgorithmen lassen sich selbstüberschneidende Polygone durch Verschneidung der jeweiligen Umringe in Multipolygone überführen oder aber stachelförmige Fortsätze, Duplikate konsekutiver Stützpunkte oder isolierte Einzelpunkte entfernen.

Im Rahmen des LandModell^{TUM} entwickelte Werkzeuge erlauben zudem eine Bereinigung einer unzulässigen geometrischen Anordnung von Polygonumringen. So werden beispielsweise überlappende Bereiche der Geometrie von Multipolygonen gegeneinander verschnitten und die dabei entstehenden Polygonfragmente anschließend mit den übrigen Fragmenten des jeweiligen Polygons verschmolzen.

6.4.2.2 Bereinigung der Geometrie von Artefakten

Ergänzend zur Überprüfung der Validitätskriterien gemäß OGC (2011) erfolgt für die landwirtschaftlichen Parzellen des InVeKoS zudem eine Prüfung der Eingangsdaten auf geometrische Artefakte. Treten solche auf, so werden diese bereinigt. Als geometrische Artefakte werden folgende Phänomene betrachtet:

- Aussparungen in Polygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung (vgl. Abbildung 23a)
- Polygone und Bestandteile von Multipolygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung (vgl. Abbildung 23b)
- schmale Fortsätze an Polygonen (vgl. Abbildung 23c)
- schmale Stege zwischen den Hauptbestandteilen von Polygonen (vgl. Abbildung 23d)

- schmale Stege zwischen Aussparungen in Polygonen und den jeweils zugehörigen äußeren Polygonumringen (vgl. Abbildung 23e)
- schmale Einkerbungen in Polygonen (vgl. Abbildung 23f)

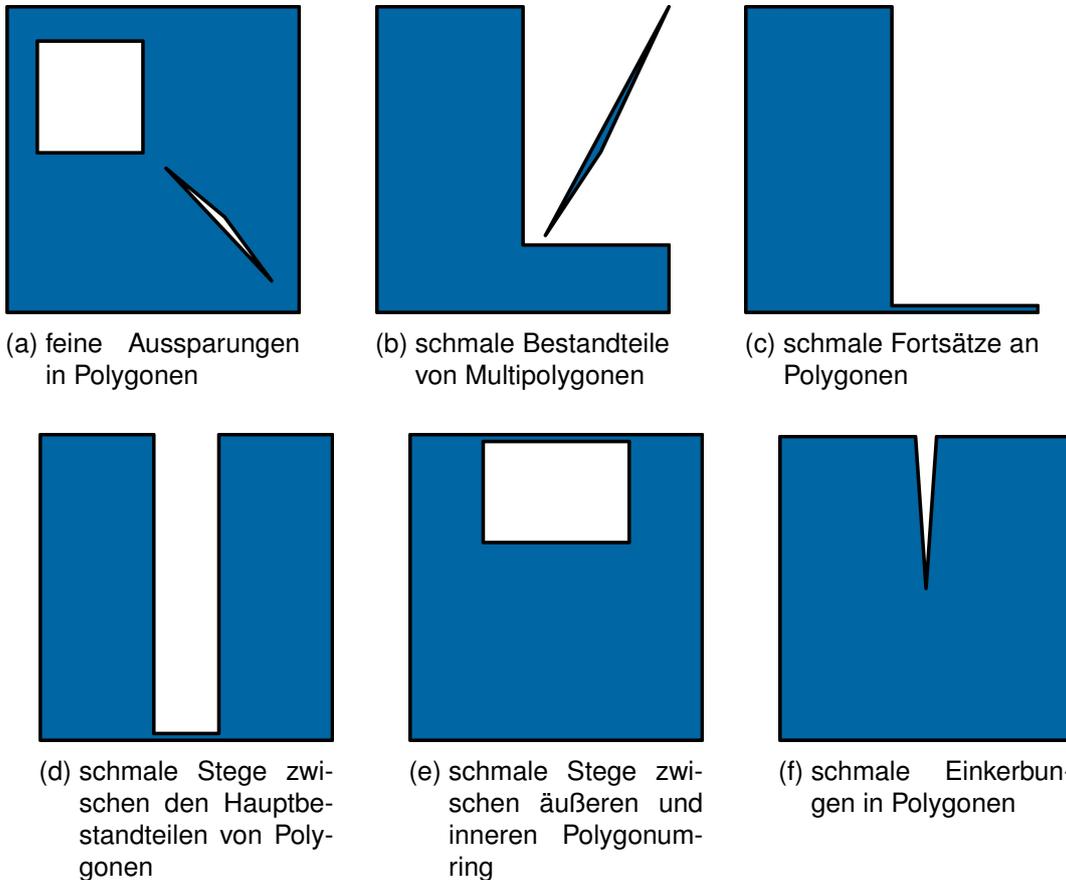


Abbildung 23: Schematische Darstellung beobachteter Geometrieartefakte an Polygonen

Da sich derartige Artefakte unmittelbar negativ auf die weiterführenden Analysen auswirken können, sind Konzepte und Methoden für deren Erkennung und Bereinigung zu entwickeln. Diese Methoden sollen in den folgenden Abschnitten dargelegt werden.

Bereinigung von Aussparungen in Polygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung:

Zur Beseitigung von Artefakten in Form von schmalen Löchern in Polygonen werden zunächst die durch die jeweiligen inneren Umringe definierten Polygone extrahiert und anschließend auf eine nutzerdefinierbare Mindestbreite ($b_{\text{minAussparung}}$) hin geprüft. Die Evaluierung der Mindestbreite erfolgt durch Pufferung der durch die inneren Umringe definierten Polygone um die Hälfte der nutzerdefinierten Mindestbreite in den Innenraum der Aussparung. Liefert diese Operation für einzelne Löcher eine leere Polygoneometrie zurück, so werden die betreffenden Aussparungen als Artefakt betrachtet und aus der Geometrie des betreffenden Objekts entfernt. Als Mindestbreite ist ein Wert von 0,5 m voreingestellt. Abbildung 24 verdeutlicht das gewählte Vorgehen anhand eines Beispiels.

Bereinigung der Polygoneometrie von Bestandteilen mit geringer räumlicher Ausdehnung:

Analog zur Untersuchung der Aussparungen in Polygonen erfolgt auch eine

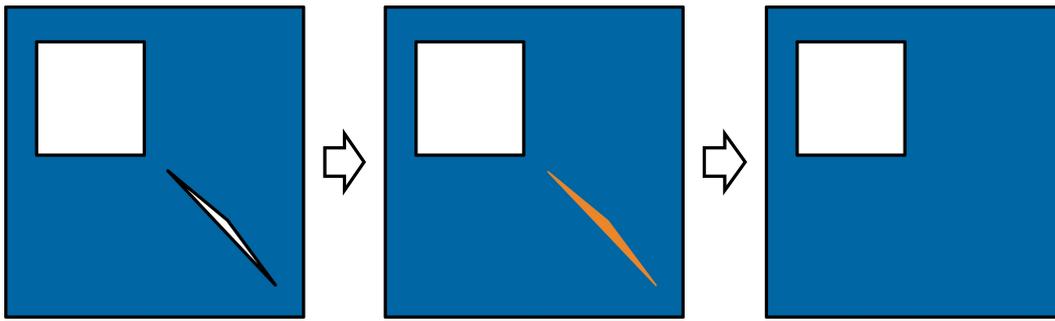


Abbildung 24: Gewähltes Vorgehen zur Detektion und Bereinigung von Artefakten in Form von Aussparungen innerhalb von Kreisringpolygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung

Überprüfung der durch die jeweiligen äußeren Umringe definierten Polygone auf das Vorhandensein einer Mindestbreite ($b_{\text{minAussparung}}$). Zu diesem Zweck werden die äußeren Umringe von Polygonen extrahiert und hinsichtlich des Überschreitens der Mindestbreite geprüft. Liefert die negative Pufferung eines einzelnen Polygons um die Hälfte von $b_{\text{minPolygon}}$ eine leere Polygoneometrie zurück, so wird der entsprechende Bestandteil eines Multipolygons als Artefakt betrachtet und aus der Geometrie entfernt. Das Prinzip der Bereinigung ist in Abbildung 25 veranschaulicht.

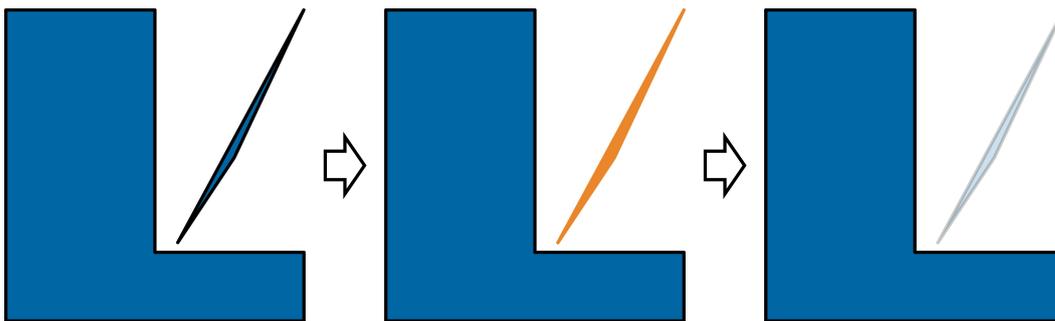


Abbildung 25: Schematische Darstellung des gewählten Vorgehens zur Detektion und Bereinigung von Artefakten in Form von Polygonen bzw. Bestandteilen von Multipolygonen mit geringer räumlicher Ausdehnung

Sollten bei der Prüfung alle Bestandteile eines (Multi-)Polygons als Artefakt betrachtet werden, so wird die ursprüngliche Polygoneometrie zur manuellen Prüfung in Form eines Fehlerreports ausgegeben.

Bereinigung der Polygoneometrie von Fortsätzen mit geringer räumlicher Ausdehnung und schmalen Stegen zwischen Polygonumringen:

In den bereitgestellten Datensätzen zu landwirtschaftlichen Parzellen finden sich bedingt durch die manuelle Digitalisierung der Parzellen bzw. durch unsaubere Verschneidungen von Polygonen verbreitet Artefakte in Form von sehr schmalen Fortsätzen, dünnen Stegen zwischen äußerem Umring und Aussparungen sowie schmalen Brücken zwischen den Hauptbestandteilen von Polygonen. Für die Bereinigung der Geometrie von derartigen Artefakten sind zunächst mögliche Artefakte von Polygonen abzuspalten und hinsichtlich ihrer räumlichen Ausdehnung zu prüfen (vgl. Abschnitt zur Bereinigung der Polygoneometrie von Bestandteilen mit geringer räumlicher Ausdehnung). Die Zerlegung der Polygone folgt dem Prinzip einer umlaufenden

Schere: aus den Polygonumringen werden zunächst potentielle Schnittlinien („Scheren“) abgeleitet und unter definierten Bedingungen zur Abtrennung möglicher Artefakte eingesetzt.

Potentielle Schnittlinien ergeben sich durch Verlängerung der an konkaven Stützpunkten anliegenden Segmente des Polygonumrings um eine nutzerdefinierbare Länge ($l_{\text{Schnittlinie}}$; voreingestellter Wert 0,5 m) sowohl in als auch entgegen der Zeichenrichtung des jeweiligen Umrings. Als konkave Stützpunkte gelten dabei diejenigen Punkte, welche zu einer Einkerbung in das Polygon führen, also zu den jeweils benachbarten Stützpunkten einen erhabenen Innenwinkel aufweisen. Für die Bestimmung derartiger Punkte werden die einzelnen Stützpunkte der Polygonumringe durchlaufen und für jeden Stützpunkt aus den beiden Richtungsvektoren zu den benachbarten Punkten mittels Kreuzprodukt die Normalenvektoren bestimmt. Für die aus den beiden Richtungsvektoren aufgespannte Ebene und damit auch für die Orientierung der beiden Richtungsvektoren zueinander lassen sich aus dem Vorzeichen der z-Komponente des Normalenvektors Informationen zu den Eigenschaften (konvex/konkav) des Stützpunktes ableiten.

Besteht zwischen potentiellen Schnittlinien und dem Polygonumring eine Überkreuzungs- bzw. eine Überlappingsbeziehung, so werden die Schnittlinie und der Polygonumring gegeneinander verschnitten und die entstehenden Liniensegmente zu geschlossenen Linienzügen zusammengeführt - ein Bestandteil des Polygons wurde abgetrennt (Abbildung 26). Besteht für beide an einem konkaven Stützpunkt anliegenden Schnittlinien eine Überkreuzungs- bzw. Überlappingsbeziehung mit einem der Polygonumringe, so erfolgt der Schnitt lediglich entlang der kürzeren Schnittlinie, wodurch die Intensität des Eingriffs gering gehalten wird. Sollte für keine der potentiellen Schnittlinien eines konkaven Stützpunkts eine Überkreuzung bzw. Überlappung mit einem der Polygonumringe bestehen, so werden im Umfeld der Schnittlinie innerhalb des Suchradius (r_{snapping}) mögliche Polygonstützpunkte für einen Ringschluss gesucht. Der Suchradius r_{snapping} wird bei der Bereinigung mit der Schnittlänge $l_{\text{Schnittlinie}}$ gleichgesetzt.

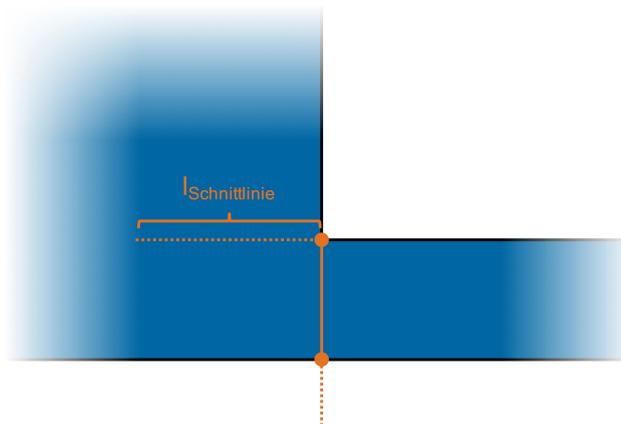


Abbildung 26: Zerschneidung der Polygoneometrie entlang von Schnittlinien nach dem Prinzip einer umlaufenden Schere

Die gebildeten Polygonfragmente lassen sich dann analog zur Prüfung von Polygonen hinsichtlich einer nutzerdefinierten Mindestbreite evaluieren (vgl. Abschnitt Bereinigung der Polygoneometrie von Bestandteilen mit geringer räumlicher Ausdehnung).

Nachdem nun die als Artefakte betrachteten Abschnitte abgespalten und aus der Geometrie entfernt wurden, können die gültigen Bestandteile des Polygons durch Auflösen gemeinsamer Begrenzungslinien miteinander verschmelzen bzw. zu Multipolygonen zusam-

mengeführt werden. Die Abbildungen 27, 28 und 29 verdeutlichen das gewählte Vorgehen beispielhaft anhand der in diesem Abschnitt behandelten Arten von Artefakten.

Der gewählte Ansatz zur Abspaltung und Prüfung möglicher Artefakte hält die ursprüngliche Geometrie des jeweiligen Polygons im Wesentlichen aufrecht. Neu eingefügte Stützpunkte befinden sich ausschließlich entlang des originalen Polygonumrings und auch die Abtrennung einzelner Bestandteile erfolgt lediglich entlang von Schnittlinien, welche sich vollständig innerhalb des originalen Polygons befinden. Dadurch entstehen keine zusätzlichen Nachbarschaftsbeziehungen sowie Überschneidungen mit umgebenden Polygonen.

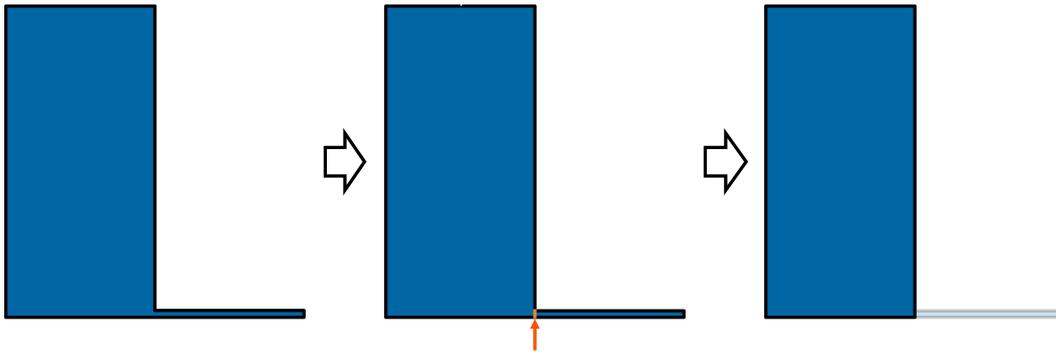


Abbildung 27: Prinzip zur Bereinigung der Parzelle geometrie von feinen Fortsätzen

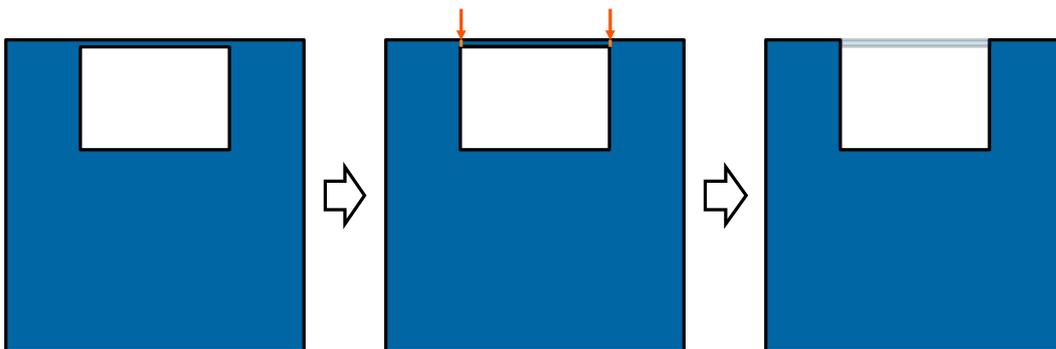


Abbildung 28: Prinzip zur Bereinigung der Geometrie von schmalen Stege zwischen äußeren und inneren Polygonumringen

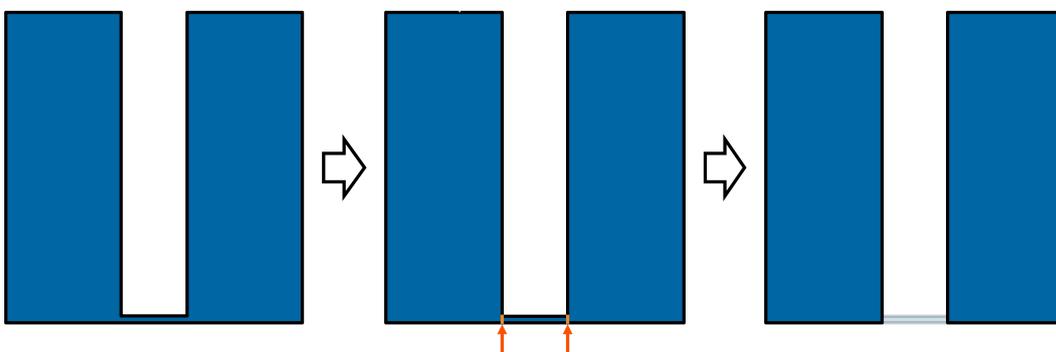


Abbildung 29: Prinzip zur Bereinigung der Geometrie von schmalen Verbindungsstege zwischen den Hauptkomponenten von Polygonen

Bereinigung der Polygoneometrie von schmalen Einkerbungen: An einigen Polygonen finden sich äußerst schmale Einkerbungen in den Polygoninnenraum. Diese Einkerbungen entstanden offenbar durch fehlerhafte oder ungenaue Digitalisierung der Parzellenpolygone und werden daher als Artefakte betrachtet.

Für die Bereinigung derartiger Ungenauigkeiten wird ein ähnlicher Ansatz wie zur Abspaltung schmaler Fortsätze verfolgt. An konvexen Stützpunkten - die Definition und Bestimmung erfolgt nach dem bereits im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Prinzip - werden die beiden jeweils angrenzenden Segmente um die Schnittlänge $l_{\text{Schnittlinie}}$ verlängert und anschließend auf Überkreuzung bzw. Überlappung mit innerem bzw. äußerem Polygonumring überprüft. Besteht dabei eine entsprechende Überschneidungs- bzw. Überlappungsbeziehung, so werden die Polygonumringe und Schnittlinien gegeneinander verschnitten und die dabei entstehenden Segmente zu einem geschlossenen Linienzug zusammengefügt (Abbildung 30). Sollte keine Überkreuzung oder Überlappung zwischen einer potentiellen Schnittlinie und der Begrenzungslinie des Polygons vorliegen, so wird versucht, die Schnittlinie innerhalb eines Suchradius auf bestehende Polygonstützpunkte zu snappen und so einen Ringschluss herbeizuführen. Für die Bereinigung wird der Suchradius (r_{snapping}) mit der Länge der Schnittlinie ($l_{\text{Schnittlinie}}$) gleichgesetzt.

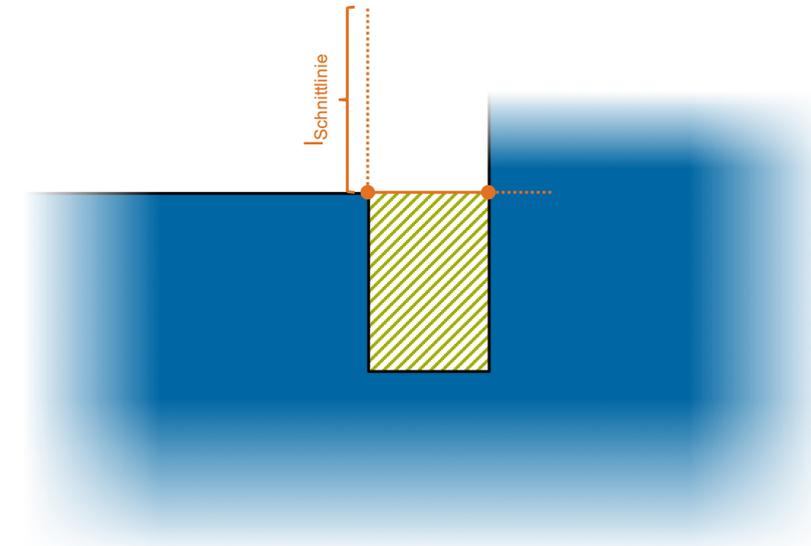


Abbildung 30: Bildung möglicher Polygone zur Füllung schmaler Einkerbungen in Polygonen bei Überkreuzung potentieller Schnittlinien mit dem Umring eines Polygons

Befindet sich ein neu gebildetes Polygon vollständig innerhalb einer Pufferzone der halben Schnittlänge $l_{\text{Schnittlinie}}$ um die äußere Hülle des Ausgangspolygons, so wird das entsprechende Polygon zum Verfüllen einer als Artefakt betrachteten Einkerbung genutzt und durch Auflösen gemeinsamer Begrenzungslinien mit der Geometrie des Ausgangspolygons verschmolzen.

Beim Verfüllen von als Artefakt betrachteten Einkerbungen werden dem ursprünglichen Polygon zusätzliche Bereiche zugeordnet, was sich unter Umständen auf Nachbarschaftsbeziehungen zu umliegenden Polygonen auswirken kann. Die Bereinigung bereits bestehender oder durch die Bereinigung der Geometrie entstandener geometrisch-topologischer Ungenauigkeiten in Form von Überlappungen benachbarter Polygone ist Gegenstand nachfolgenden Abschnitts 6.4.2.3

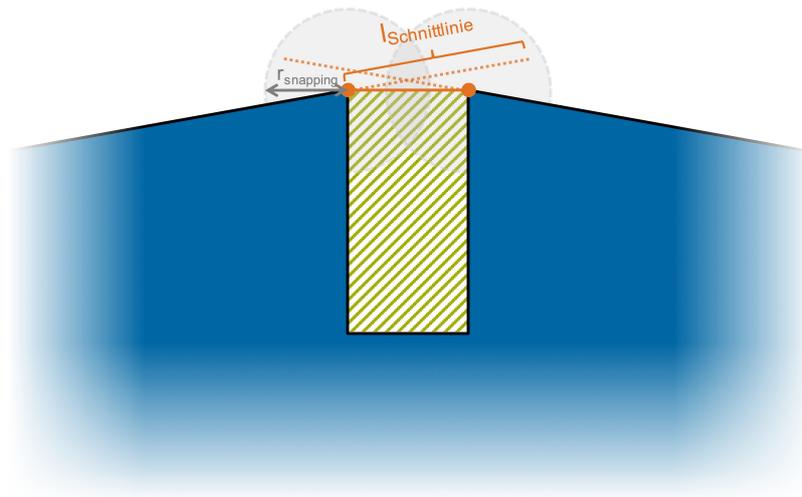


Abbildung 31: Bildung möglicher Polygone zur Füllung schmaler Einkerbungen in Polygonen bei fehlender Überkreuzung potentieller Schnittlinien mit dem Umring eines Polygons durch Snapping des Schnittlinienendpunktes auf Stützpunkte des Polygonumrings

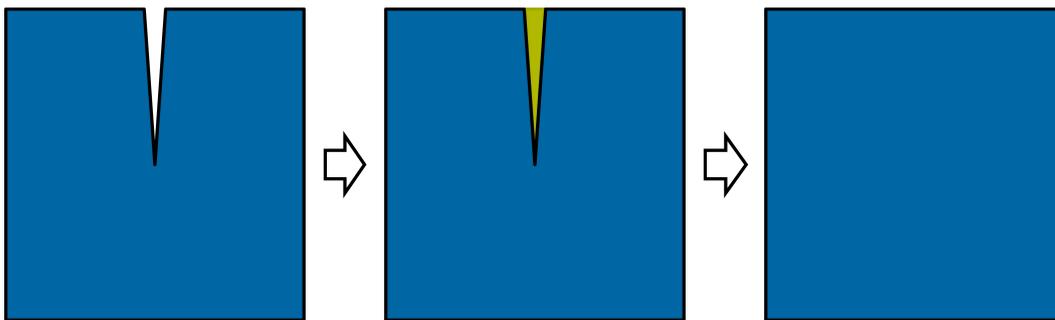


Abbildung 32: Prinzip der Bereinigung der Polygoneometrie von schmalen Einkerbungen

Die Überprüfung der Validität der Polygoneometrie sowie auch die Bereinigung von Artefakten erfolgt über einen eigens entwickelten *Custom Transformer* innerhalb des FME-Workspaces zur Datenintegration. Zusätzlich zu den bereits in FME implementierten Methoden zur Erkennung und Bereinigung invalider Geometriezustände werden zudem eigene Prüfroutinen entwickelt.

Die Bereinigung von Artefakten erfolgt vollständig unter Verwendung selbst entwickelter Geoverarbeitungsketten. Die beschriebenen, nutzerdefinierbaren Parameter lassen sich dem *Custom Transformer* als sog. *Published Parameters* übergeben. Als Standardwerte für die Mindestbreite von Polygonbestandteilen ($b_{\min\text{Polygon}}$) bzw. Aussparungen in Polygonen ($b_{\min\text{Aussparung}}$) sowie auch für die Länge der Schnittlinie ($l_{\text{Schnittlinie}}$) und den Suchradius für das Snapping einer Schnittlinie auf einen Polygonstützpunkt (r_{snapping}) ist ein Wert von 0,5 m voreingestellt.

Beispiele für die Ergebnisse einer entsprechenden Verfüllung von Einkerbungen bzw. die Abspaltung von Artefakten sind in den Abbildungen 33 und 34 dargestellt. Das in Abbildung 33 dargestellte Feldstückpolygon besitzt eine Einkerbung im äußeren Polygonumring mit einer maximalen Breite von weniger als 4 cm und einer Länge von mehr als 150 m. Es wird daher als Artefakt betrachtet und entsprechend verfüllt.



Abbildung 33: Beispiel für die Verfüllung einer als Artefakt betrachteten Einkerbung eines Polygons; die Einkerbung besitzt eine maximale Breite von weniger als 4 cm und eine Länge von mehr als 150 m

Die Fortsätze des in Abbildung 34 gezeigten Feldstückpolygons besitzen eine maximale Breite von weniger als 15 cm und eine Länge von rund 90 m (links) bzw. eine maximale Breite von weniger als 25 cm und eine Länge von mehr als 80 m (rechts). Sie werden daher als Artefakt betrachtet und vom Polygon abgespalten.



Abbildung 34: Beispiel für die Abspaltung von als Artefakt betrachteten Polygonfortsätzen; die Fortsätze besitzen eine maximale Breite von weniger als 15 cm und eine Länge von rund 90 m (links) bzw. eine maximale Breite von weniger als 25 cm und eine Länge von mehr als 80 m (rechts)

6.4.2.3 Prüfung auf geometrisch-topologische Konsistenz

Die Ausgangsdaten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung aus InVeKoS weisen teils geometrisch-topologische Ungenauigkeiten in Form von Überlappungen zwischen benachbarten Geoobjekten auf. Da derartige Überlappungen einerseits inkonsistente Zustände darstellen und sich andererseits unmittelbar nachteilig auf eine eindeutige Historisierung von Ausschnitten der Realwelt auswirken, sind Werkzeuge zur Korrektur zu entwickeln.

Der im LandModell^{TUM} gewählte Ansatz zur Bereinigung folgt der grundlegenden Annahme, dass Geoobjekte mit kleinerer geometrischer Ausdehnung in höherer Detailschärfe erfasst werden. Zunächst werden Geoobjekte, welche eine Überlappungsbeziehung zu anderen Geoobjekten der selben Klasse aufweisen selektiert und deren Geometrie gegeneinander verschnitten. Die dabei entstehenden Splitterpolygone werden der Geometrie des jeweils kleinsten beteiligten Geoobjekts zugeordnet und mit dieser verschmolzen. Abbildung 35 veranschaulicht diesen Prozess anhand eines Beispiels.

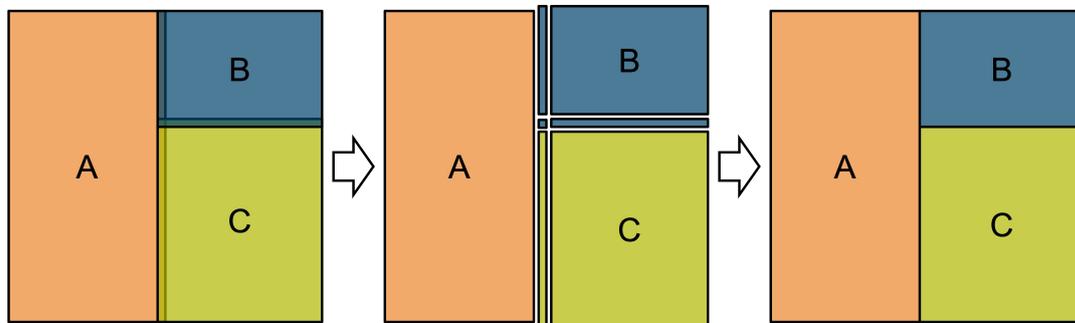


Abbildung 35: Prinzip der Bereinigung von Überlappungen zwischen flächenhaften Geoobjekten der selben Art; die Geometrie der beteiligten Objekte wird gegeneinander verschnitten und die Splitterpolygone dem jeweils flächenmäßig kleinsten an der Überlappung beteiligten Objekt zugeordnet

Überschreitet für ein Geoobjekt der Anteil nicht eindeutig einem Polygon zuordenbarer Teilbereiche einen nutzerdefinierbaren Schwellwert, so unterbleibt eine geometrische Korrektur und alle an einer Überschneidung mit diesem Polygon beteiligten Objekte werden in Form eines Fehlerreports zur manuellen Nachkorrektur ausgegeben. Der Anteil nicht eindeutig einem Polygon zuordenbarer Geometrieabschnitte je Polygon lässt sich in Form des Quotienten aus der Flächensumme überlappender Geometrieabschnitte und der Gesamtfläche des Polygons quantifizieren.

$$\text{Flächenanteil}_{\text{nicht eindeutig zuordenbar}} = \frac{\sum \text{Flächeninhalt}_{\text{nicht eindeutig zuordenbar}}}{\text{Flächeninhalt}_{\text{Polygon}}} \quad (6.1)$$

Die Implementierung dieser Methode zur Bereinigung erfolgt mit Hilfe eines eigens entwickelten *Custom Transformers* innerhalb des FME-Workspaces zur Datenintegration der Objektklassen Feldstück und Schlag. Als maximal zulässiger Flächenanteil für die Überlappung zwischen Objekten ist ein Wert von 10 % voreingestellt. Objekte, deren Überlappung den gesetzten Grenzwert überschreitet, werden zur manuellen Korrektur in Form eines Fehlerreports ausgegeben.

6.4.2.4 Geometrisch-semantische Konsistenz

Die Überprüfung der geometrisch-semantischen Konsistenz bezieht sich insbesondere auf die bestehende Aggregationshierarchie zwischen Objekten vom Typ *Feldstück* und Objekten vom Typ *Schlag*. Definitionsgemäß ist ein *Schlag* eine Untereinheit eines *Feldstücks*. Entsprechend darf die Geometrie von *Schlägen* nicht über die Geometrie von *Feldstücken* hinausragen. Aus diesem Grund werden lediglich die Bereiche von *Schlägen* innerhalb von *Feldstücken* im Modell berücksichtigt. Die Geometrie der *Schläge* ist entsprechend gegen die Geometrie des beinhaltenden *Feldstücks* zu verschneiden. Abgetrennte Teilbereiche werden in einem Fehlerreport ausgegeben.

6.4.3 Detektion identischer Geoobjekte in aufeinanderfolgenden Schnappschüssen

Für den Abgleich der Elemente einer zu integrierenden Zeitscheibe mit bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten sind zunächst die Objekte des entsprechenden Typs aus dem Datenbanksystem zu laden, welche zum Zeitpunkt des zu integrierenden Schnappschusses Gültigkeit besitzen. Die Suche nach bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten in der zu integrierenden Zeitscheibe erfolgt in zwei Phasen innerhalb eines selbst entwickelten *Custom Transformers*.

Zunächst werden in einer **ersten Phase** aus der zu integrierenden Zeitscheibe Objekte extrahiert, welche die selbe Art und die identische geometrische Ausdehnung wie bereits im Informationssystem abgebildete Elemente aufweisen. Diese Objekte der neuen Zeitscheibe erhalten den Objektidentifikator des bereits im Informationssystem abgebildeten Objekts zugewiesen. Die Lebensdauer des bereits im Datenbanksystem abgebildeten Objekts bleibt bestehen und es erfolgt ein Abgleich der Objektzustände nach dem in Abschnitt 6.4.4 beschriebenen Vorgehen.

Sämtliche Objekte, für die in der ersten Phase keine Entsprechung in der jeweils anderen Gruppe zu finden ist, werden in einer **zweiten Phase** unter Berücksichtigung einer nutzerdefinierbaren Toleranz (siehe Abschnitt 6.3.2) mit Objekten der jeweils anderen Zeitscheibe verglichen. Dazu werden aus der neu zu integrierenden Zeitscheibe diejenigen Geometrieobjekte selektiert, die sich innerhalb der Geometrie eines bereits im System abgebildeten Objekts zuzüglich eines nutzerdefinierbaren Pufferbereichs befinden. Für die selektierten Objekte der zu integrierenden Zeitscheibe ist in einem nächsten Schritt zu prüfen, ob sich die Geometrie des bereits im System abgebildete Objekt zudem vollständig innerhalb der ebenfalls um den Toleranzbereich gepufferten Geometrie des Geoobjekts der zu integrierenden Zeitscheibe befindet. Sind diese beiden Kriterien erfüllt und lässt sich dabei jeweils eine 1:1 Beziehung feststellen, so werden beide Objekte als identisch betrachtet. Lässt sich auf diese Weise ein Objekt der zu integrierenden Zeitscheibe als identisch mit einem bereits im System abgebildeten Objekt klassifizieren, so bekommt das entsprechende Objekt den Identifikator des bereits in Informationssystem abgebildeten Objekts zugewiesen und es erfolgt anschließend ein Abgleich der Zustände der beiden Objektversionen (siehe Abschnitt 6.4.4). Da sich die Geometrie der beiden Versionen des selben Objekts unterscheiden, hat eine Historisierung des Geometriezustands zu erfolgen. Dazu wird in der Geometrietabelle der jeweiligen Objektart einerseits das Ende der Lebenszeit des untergehenden Geometriezustands (Eintragung des Lebenszeitendes im Feld *validTo*) dokumentiert und andererseits ein neuer Geometriezustand des Objekts mit zunächst unendlicher Lebensdauer erzeugt.

Gleichzeitig wird im Feld *terminationDate* des untergehenden Geometriezustands sowie auch in Feld *creationDate* die aktuelle Systemzeit eingetragen. Um die Veränderungen dieser als *Update* klassifizierten Übergangsbeziehung für Analysen zugänglich zu machen, werden die Übergänge nach dem in Abschnitt 6.4.5 beschriebenen Vorgehen festgehalten.

Als geometrische Toleranz für *Feldstücke* und *Schläge* ist ein nutzerdefinierbarer Wert von 6 m - dies entspricht typischerweise zwei Arbeitsbreiten - voreingestellt. Für die Objektarten der *Tatsächlichen Nutzung* ist als Toleranzwert von 1,0 m sowie für *Flurstücke* ein Toleranzwert von 0,01 m vorkonfiguriert.

Findet sich für ein bereits im Informationssystem abgebildetes Objekt keine Entsprechung in der zu integrierenden Zeitscheibe so endet das Lebenszeitintervall des betreffenden Objekts, was in der jeweiligen Objektartentabelle über eine Eintragung des Lebenszeitendes im Feld *validTo* zu dokumentieren ist. Gleichzeitig wird in das Feld *terminationDate* des betreffenden Objekts die jeweilige Systemzeit eingetragen. Das Ende des Lebenszeitintervalls des betreffenden Objekts pflanzt sich zudem kaskadierend auf die Attributzustände sowie auch auf die Beziehungen des jeweiligen Objekts zu anderen Objekten fort. Im Informationssystem endet daher auch die Gültigkeit der jeweils zuletzt gültigen Attributzustände sowie der Beziehungen mit Fremdschlüsselverweisen auf das betreffende Objekt. Analog zum Ende der Objektlebensdauer bzw. der Lebensdauer des Geometriezustände ist in den jeweiligen *validTo*-Feldern der Tabellen das Ende des Lebenszeitintervalls sowie auch das *terminationDate* einzutragen.

Gleichzeitig beginnt das Lebenszeitintervall derjenigen Objekte einer zu integrierenden Zeitscheibe, für die keine Entsprechung mit bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten festzustellen ist. Neue Objekte sowie auch deren Attributzustände und Beziehungen zu anderen Objekten werden in der jeweiligen Objektartentabelle sowie auch in den jeweiligen Attributwert- und Beziehungstabellen vermerkt. Die Lebenszeitintervalle beginnen zum Stichtag eines Schnappschusses und besitzen zunächst eine unendliche Lebensdauer (hier: 01.01.3000).

6.4.4 Abgleich von Objektzuständen

Nach der Extraktion identischer Objekte in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben sind die Zustände der betreffenden Objekte gegeneinander abzugleichen. Zu diesem Zweck erfolgt ein paarweiser Vergleich der Attributwerte und Beziehungen von Versionen des selben Objekts.

Sind die einzelnen Attributwerte zweier Objektversionen identisch, so bleibt die Lebensdauer des jeweiligen Attributwerts bestehen. Unterscheiden sich die Attributwerte zwischen aufeinanderfolgenden Versionen eines Objekts, so endet das Lebenszeitintervall des Attributwerts zum Zeitpunkt des Schnappschusses. In der betreffenden Attributwerttabelle wird dies über die Eintragung des Lebenszeitendes des Zustands im Feld *validTo* vermerkt und im Feld *terminationDate* die jeweils aktuelle Systemzeit eingetragen. Gleichzeitig beginnt die Lebensdauer des neuen Attributzustandes, welcher in der jeweiligen Tabelle mit Wertbelegung und zeitlichen Gültigkeitsintervall einzutragen ist. Die Lebensdauer eines neuen Zustandes beginnt dabei mit dem Stichtag der zu integrierenden Zeitscheibe (Spalte *validFrom*). Als *creationDate* für die jeweilige Attributversion ist die jeweilige Systemzeit einzutragen. Das Ende des Lebenszeitintervalls ist zunächst unendlich (hier: 01.01.3000).

Für landwirtschaftliche Parzellen des InVeKoS sind zusätzlich zeitlich begrenzt gültige Beziehungen und Aggregationshierarchien zwischen Objekten durch eine Gegenüberstellung bestehender Fremdschlüsselverweise abzugleichen. Dies trifft insbesondere auf die bestehende und explizit modellierte Aggregationshierarchie zwischen Objekten vom Typ Feldstück und Objekten vom Typ *Schlag* sowie auch für die Managementbeziehungen zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und *Felstücken*, *Schlägen* und *Agrarumweltmaßnahmen* zu. Der Abgleich sowie auch die Dokumentation erfolgt analog dem Vorgehen zur Abbildung von Attributen mit zeitlich begrenzter Gültigkeit.

6.4.5 Analyse, Klassifikation und Beschreibung von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit

Die Analyse von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten wie auch deren Kategorisierung ist Bestandteil des bereits in Abschnitt 6.4.3 erläuterten *Custom Transformers* zur Detektion von zeitlichen Übergängen zwischen Objekten einer Art. Zunächst erfolgt eine gegenseitige Verschneidung von untergehenden und entstehenden Geoobjekten bzw. Geometriezuständen. Für sämtliche von einem Übergang betroffene Geometriefragmente sind als nächstes Einzelschicksale zu untersuchen und anschließend die Übergangsbeziehungen auf Objektebene zu kategorisieren. Für jedes Geometriefragment ist dabei festzustellen, ob ein Bestandteil eines entstehenden Objekts bereits ein Bestandteil eines untergehenden Objekts war bzw. ob ein Geometriefragment eines untergehenden Objekts zu einem Bestandteil eines entstehenden Objekts der selben Art wird. Für jedes der durch gegenseitige Verschneidung entstandene Geometriefragment sind dabei drei mögliche Fälle von Einzelschicksalen zu unterscheiden:

- (a) ein Geometriefragment eines untergehenden Geoobjekts geht in ein entstehendes Geometrieobjekt der selben Art über (*Eingliederung*). Es lässt sich also einem Vorgänger- und einem Nachfolgerobjekt der selben Art zuordnen.
- (b) ein Geometriefragment war nur Bestandteil eines untergehenden Objekts und findet sich in keinem entstehenden Geometrieobjekt der selben Art wieder. Es lässt sich also lediglich einem Vorgänger- aber keinem Nachfolgerobjekt der selben Art zuordnen (*objektartenübergreifender Übergang Typ 1*).
- (c) ein Geometriefragment ist Bestandteil eines entstehenden Geometrieobjekts, war aber zuvor kein Bestandteil eines untergehenden Geometrieobjekts der selben Art. Es lässt sich also einem Nachfolgerobjekt aber keinem Vorgängerobjekt der selben Art zuordnen (*objektartenübergreifender Übergang Typ 2*).

Eine Betrachtung sämtlicher Einzelschicksale von Geometriefragmenten ermöglicht anschließend auf Objektebene eine Klassifikation der Übergangsbeziehungen. Dabei lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

1. **Update:** Wird der Übergang zwischen Geometrieobjekten gemäß dem in Abschnitt 6.4.3 beschriebenen Vorgehen als Aktualisierung des Geometriezustands interpretiert, so wird die Übergangsbeziehung zwischen Geometriezuständen als *Update* bezeichnet.
2. **Zusammenlegung:** Finden sich in einem neuen Geometrieobjekt Bestandteile von mindestens zwei untergehenden Objekten der selben Art (für alle Bestandteile gilt Fall a) oder mindestens ein Bestandteil eines untergehenden Objekts der selben Art

(Fall a) sowie auch mindestens ein Geometriebestandteil, welcher zuvor nicht Bestandteil eines untergehenden Objekts der selben Art ist (Fall c), so wird der Übergang insgesamt als *Zusammenlegung* klassifiziert.

3. **Abspaltung:** Besitzt ein Nachfolgeobjekt genau ein Vorgängerobjekt der selben Art (Fall a) und sind im entstehenden Objekt keine Bestandteile ohne Vorgängerobjekt der selben Art (Fall c) enthalten, so wird der Übergang als *Abspaltung* bezeichnet.
4. **Objektartenübergreifender Übergang:** Grundlegend sind zwei Arten des objektartenübergreifenden Übergangs zu unterscheiden:
 - von einer *Entstehung eines vollständig neuen Geoobjekts* ist die Rede, wenn ein neues Geoobjekt ausschließlich aus Elementen hervorgeht, die keinem Vorgängerobjekt der selben Art zuzuordnen sind (Fall c)
 - als *vollständiger Wegfall* eines Geometrieobjekts wird eine Übergangsbeziehung bezeichnet, wenn kein Bestandteil eines Vorgängerobjekts Bestandteil eines entstehenden Nachfolgerobjekts der selben Art ist (Fall b)

Die Klassifikation der Übergangsbeziehungen ist innerhalb des FME-Workspace zur Datenintegration als *CustomTransformer* umgesetzt.

6.5 Ergebnisse

Die kleinteilige Abbildung der verschiedenen Arten einer zeitlichen Veränderung sowohl im semantischen wie auch im logischen Datenmodell ermöglicht für die im System abgebildeten Objektarten eine Vielzahl an weiteren Betrachtungen. So ermöglicht das Informationssystem eine Rekonstruktion von Zuständen der Realwelt zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit ebenso wie die Analyse von Attributzeitreihen für Einzelobjekte, die Analyse und Verortung verschiedener Kategorien zeitlicher Übergangsbeziehungen zwischen Objekten der selben oder unterschiedlichen Art (= objektartenübergreifende Übergangsbeziehung). Dabei ist zu betonen, dass sämtliche Analysen landesweit für ganz Bayern durchgeführt wurden und entsprechende Betrachtungen für den Zeitraum von 2010 bis 2018 ff. möglich sind. Die folgenden Abschnitte sollen einen Überblick möglicher Betrachtungsweisen vermitteln, welche auf Grundlage des LandModell^{TUM} möglich sind. Aufgrund der großen Vielzahl möglicher Analysen und Betrachtungsweisen kann sich die Darstellung der Ergebnisse in diesem Abschnitt lediglich auf die Vermittlung von Eindrücken beschränken.

6.5.1 Betrachtungen zur zeitlichen Stabilität der abgebildeten Objekte am Beispiel landwirtschaftlicher Parzellen

Eine grundlegende Intention des LandModell^{TUM} besteht darin, die im Informationssystem abgebildeten Elemente als stabile Referenzobjekte zur Fusion interdisziplinärer Information nutzen zu können. Damit liegt ein großes Augenmerk auf einer möglichst langfristigen Aufrechterhaltung der Lebensdauer von Objekten. Gleichzeitig soll es mit Hilfe des Informationssystems möglich sein, die Entwicklung der Kulturlandschaft, ihrer Bestandteile sowie auch die zeitlich begrenzt gültigen Beziehungen zwischen einzelnen Elementen über die Zeit im Informationssystem abzubilden und dadurch für weiterführende Analysen zugänglich zu machen. Es gilt also, die Objekte einerseits über eine möglichst lange Zeitspanne stabil zu halten und andererseits die zeitliche Entwicklung detailliert abzubilden.

Für den Aufbau des Informationssystems sind neben Zustandsveränderungen und Übergängen zwischen einzelnen Objekten über die Zeit (= zeitliche Topologie von Geoobjekten) insbesondere auch Objektlebensdauern aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben unterschiedlicher Datenquellen und Datensätze abzuleiten. Voraussetzung für die Ableitung der Objektlebensdauer sowie auch für die Erkennung von Objektzustandsveränderungen ist die Extraktion identischer Objekte aus aufeinanderfolgenden Zeitscheiben. Im Rahmen des LandModell^{TUM} wird hierfür ein Werkzeug implementiert, mit dessen Hilfe sich identische Objekte aus konsekutiven Zeitscheiben anhand ihrer Klassenzugehörigkeit und ihrer geometrischen Ausdehnung extrahieren lassen. Gegenüber den meisten klassischen Ansätzen bestehender *Geoinformationssysteme* (GIS) erfolgt im LandModell^{TUM} eine Trennung von Objekt und Objektgeometrie. Entsprechend wird die Geometrie als Attribut eines Objekts betrachtet, welches in gewissen Grenzen auch Zustandsveränderungen unterliegen kann, ohne dass es zu einer Bildung neuer Geoobjekte kommt. Dadurch ist es möglich, die Lebensdauer von Geoobjekten selbst beim Auftreten kleinerer geometrischer Veränderungen fortzuführen. Entsprechende Werkzeuge zur Ableitung der Objektlebensdauer, zur Erkennung und Dokumentation von Objektzustandsveränderungen auf Attributebene sowie zur Dokumentation der Reallokation einzelner Geometriefragmente untergehender, entstehender oder aktualisierter Geoobjekte oder Geometriezustände liegen im LandModell^{TUM} für Flurstücke (Klasse *CadastralParcel*), die Klassen der Pakete *Vegetation* (7 Objektarten), *SettlementArea* (9 Objektarten), *TrafficArea* (5 Objektarten), *SurfaceWater* (2 Objektarten) sowie für die landwirtschaftliche Parzellen (Klassen *FarmerBlock*, *AgriculturalParcel*) vor.

Da sich die Analysen im Rahmen der vorliegenden Arbeit insbesondere auf die zeitliche Entwicklung der landwirtschaftlichen Flächennutzung, der Parzellenstruktur sowie auf Übergänge zwischen landwirtschaftlichen Flächen und anderen Formen der Landnutzung konzentrieren, beschränken sich die Ausführungen im Folgenden insbesondere auf die räumlichen Einheiten *Feldstück* und *Schlag*.

6.5.1.1 Zeitliche Stabilität von Objekten des Typs Feldstück

Bei der Integration einer zusätzlichen Zeitscheibe kann es einerseits zu einem Fortbestand oder aber andererseits zum Untergang bestehender bzw. zur Neubildung von Objekten kommen. Abbildung 36 gibt einen Überblick der Fortführung bzw. Neubildung von Feldstücksobjekten (Klasse *FarmerBlock*) für die ins Informationssystem integrierten Datensätze der Jahre 2010 bis 2018. In Summe bleibt die Anzahl der Feldstücke im betrachteten Zeitraum auf einem relativ konstantem Niveau von rund 1,8 Mio. Objekten.

Die Abbildung zeigt die Anteile der je Zeitscheibe als Fortführung eines bereits im Informationssystem abgebildeten Objekts interpretierten Feldstücke sowie die Anzahl der als Objektneubildung betrachteten Parzellen. Die Neubildung geht mit Ausnahme der „Objektneubildung ohne Vorgänger“ mit dem Untergang von bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten der selben Art einher. Damit ist der Aspekt des Untergangs von Objekten lediglich implizit in der Darstellung enthalten.

Tabelle 2 gibt einen detaillierten Überblick der Anteile fortgeführter bzw. neugebildeter Objekte bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben von Feldstücksobjekten in das Informationssystem. Sämtliche Feldstücksobjekte werden bei der Erstintegration von Daten als „Objektneubildung ohne Vorgänger“ interpretiert und entsprechend im Informationssystem abgebildet. Bei der Integration der darauffolgenden Zeitscheiben werden zwischen 79,3 % und 89,5 % der Elemente einer Zeitscheibe als Fortführung eines bereits im Informationssystem

abgebildeten Objekts interpretiert und die Objektlebensdauer der bereits im Informationssystem abgebildeten Objekte entsprechend fortgeführt. Für weitere 4,2 % bis 9,8 % der Elemente einer Zeitscheibe bewegt sich der Grad der geometrischen Abweichung zwischen den bereits im Informationssystem abgebildeten und zu integrierenden Objekten innerhalb des gesetzten Toleranzbereichs, so dass die Lebensdauer der betreffenden Objekte aufrechterhalten wird und lediglich eine neue Version des Geometriezustands erzeugt wird. In Summe lassen sich damit zwischen 89,1 % und 93,7 % der Feldstücksobjekte einer Zeitscheibe als Fortführung eines bereits im Informationssystem abgebildeten Objekts interpretieren. Entsprechend bedingen lediglich zwischen 6,3 % und 10,9 % der Elemente einer zu integrierenden Zeitscheibe eine Neubildung von Objekten im Informationssystem bzw. das Ende der Lebensdauer von bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten. Als Hauptursache für die Neubildung von Objekten lässt sich die Abspaltung und die Zusammenlegung von Feldstücken identifizieren. Eine Zusammenstellung der absoluten Zahlen findet sich in Tabelle 4 des Anhangs (Abschnitt B.1).

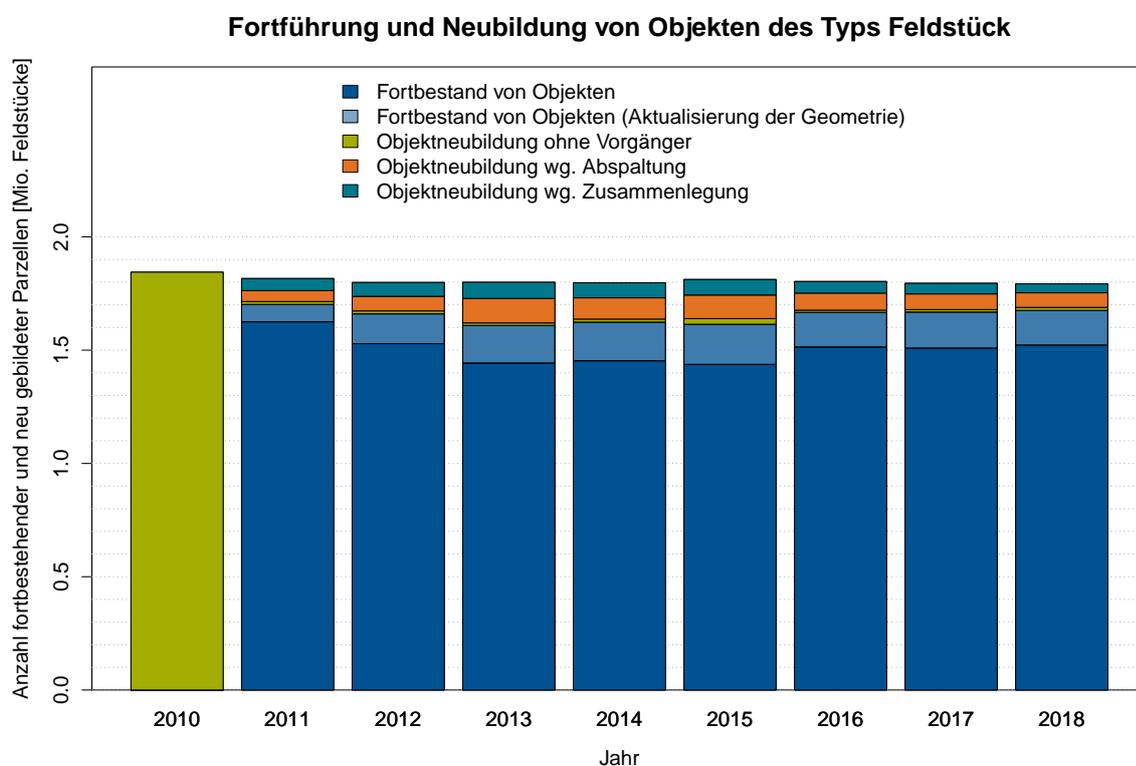


Abbildung 36: Darstellung der zeitlichen Stabilität von Feldstücksobjekten; die Jahresangaben beziehen sich auf die ins Informationssystem integrierten Zeitscheiben

Entscheidend für die Untersuchung der Attributzeitreihen von Einzelobjekten sowie auch für die Eignung einzelner Objekte als Referenz für die Verknüpfung interdisziplinärer Information ist insbesondere die zu erwartende Lebensdauer der jeweiligen Objekte. Da es sich bei dem hier vorgestellten Informationssystem um ein System für ein fortlaufendes Monitoring handelt, lassen sich keine Lagemaße wie mittlere oder mediane Objektlebensdauer angeben. Das zunächst nach oben offene Lebenszeitintervall würde hier zu einer Verzerrung und zu irreführenden Aussagen führen. Um dennoch Aussagen zur beobachteten bzw. zu erwartenden Lebensdauer von Feldstücken treffen zu können, werden an dieser Stelle die Anteile von Feldstücken bestimmt, die zu bestimmten Zeitpunkten sowie auch noch nach definierten Zeitintervallen Gültigkeit besitzen. Abbildung 37 zeigt die Anteile von Feldstücken, die am

Tabelle 2: Relative Anteile der Fortführung und Neubildung von Feldstücken bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben

	Jahr der integrierten Zeitscheibe									
	2010 [%]	2011 [%]	2012 [%]	2013 [%]	2014 [%]	2015 [%]	2016 [%]	2017 [%]	2018 [%]	
Fortbestand (identische Geometrie)	-	89,5	85,0	80,1	80,8	79,3	83,9	84,0	84,9	
Fortbestand (Geometrieupdate)	-	4,2	7,3	9,3	9,5	9,8	8,5	8,9	8,6	
Fortbestand gesamt	-	93,7	92,3	89,4	90,3	89,1	92,5	92,9	93,5	
Objektneubildung ohne Vorgänger	100,0	0,7	0,7	0,6	0,7	1,4	0,5	0,6	0,7	
Objektneubildung wg. Abspaltung	-	2,7	3,6	6,0	5,2	5,7	4,2	3,9	3,6	
Objektneubildung wg. Zusammenlegung	-	2,9	3,4	4,0	3,7	3,8	2,8	2,6	2,2	
Neubildung gesamt	100,0	6,3	7,7	10,6	9,7	10,9	7,5	7,1	6,5	

01.06. des auf der x-Achse angegebenen Jahres (= 100 %) sowie auch noch nach einem, zwei, drei, vier oder fünf Jahren eine zeitliche Gültigkeit besitzen.

Beobachtete Objektlebensdauer von Feldstücken

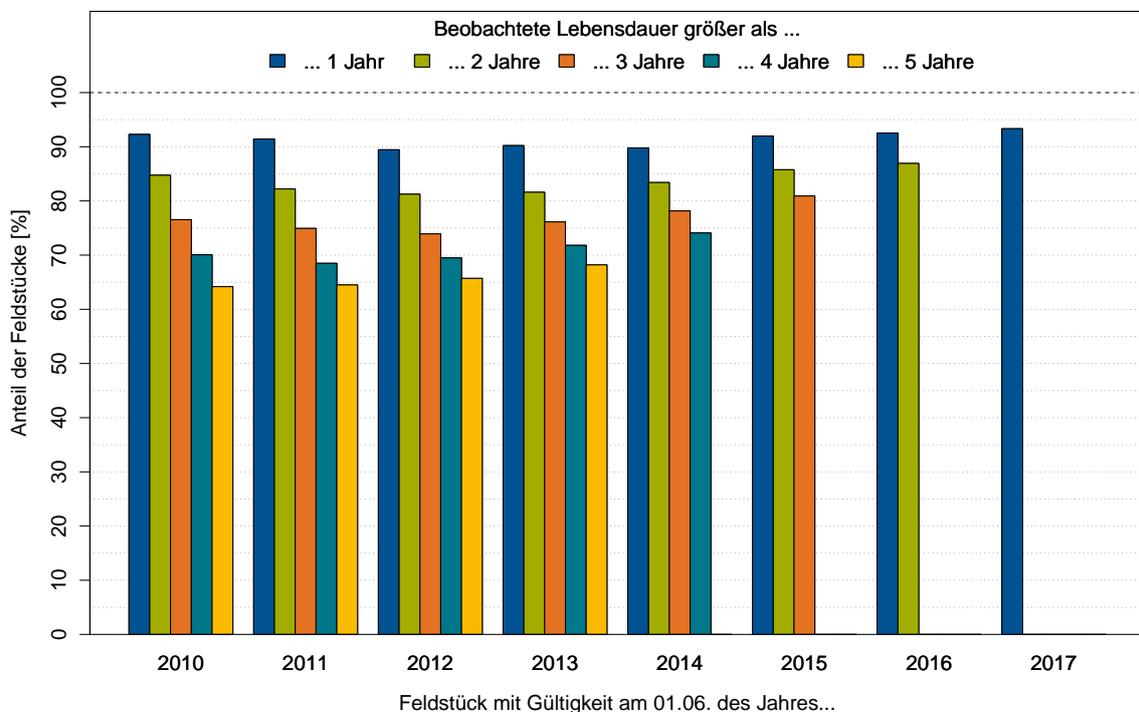


Abbildung 37: Beobachtete zeitliche Gültigkeit von Objekten des Typs Feldstück nach verschiedenen Zeitintervallen

Da lediglich bis einschließlich dem Jahr 2018 Aussagen getroffen werden können, werden ab dem Jahr 2014 lediglich noch die folgenden vier, ab dem Jahr 2015 noch die folgenden drei, ab dem Jahr 2016 noch die folgenden zwei und ab dem Jahr 2017 nur noch ein Folgejahr betrachtet. So besitzen beispielsweise von den 1 844 050 Feldstücken mit Gültigkeit zum 01.06.2010 nach einem Jahr noch 92,2 % nach zwei Jahren noch 84,7 %, nach drei Jahren noch 76,5 % nach vier Jahren noch 70,0 % und nach 5 Jahren noch mindestens noch 64,2 % Gültigkeit. Was die längerfristige Gültigkeit anbetrifft - gemeint sind zwei und mehr Jahre - lässt sich über die Jahre eine leicht positive Entwicklung beobachten.

6.5.1.2 Zeitliche Stabilität von Objekten des Typs Schlag

Schlagobjekte verfügen in den InVeKoS-Datenbanken des BayStMELF erst seit dem Jahr 2015 flächendeckend über eine Geometrie. Zuvor wurden sie lediglich mit Bezug auf Objekte vom Typ Feldstück abgebildet. Mit dem Ziel umfassendere Untersuchungen von Attributzeitreihen – beispielsweise zur Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen – durchführen zu können wird für die Schlaggeometrie die Feldstücksgeometrie angenommen, sofern sich auf einem Feldstück lediglich ein Schlag befindet und die angegebene Schlagfläche der Feldstücksfläche entspricht. Befindet sich auf einem Feldstück mehr als ein Schlag oder ist die angegebene Größe des Schlages kleiner der Flächengröße des jeweiligen Feldstücks, so besitzen die betreffenden Schläge keine eigene Geometrie. In diesem Fall werden Schläge als in aufeinanderfolgenden Zeitscheiben identisch klassifiziert, wenn sie sich auf das selbe Feldstück beziehen und in konsekutiven Zeitscheiben übereinstimmende Angaben zur Schlaggröße enthalten. Finden sich auf einem Feldstück mehrere Schläge mit identischer Flächengröße so wird bei der Integration einer zusätzlichen Zeitscheibe von einem Untergang bestehender und einer Neubildung von Schlagobjekten ausgegangen.

Abbildung 38 zeigt analog dem in Abschnitt 6.5.1.1 beschriebenen Vorgehen die Anteile der Schläge einer Zeitscheibe, die als Fortführung bereits im Informationssystem abgebildeter Elemente betrachtet werden bzw. neu zu bilden sind. Im betrachteten Zeitraum bewegt sich die Anzahl der Schläge je Zeitscheibe in einem Bereich von ca. 2,0 Mio. Objekten mit einer über die einzelnen Jahre leicht abnehmenden Tendenz. Bei der ersten ins Informationssystem integrierten Zeitscheibe werden sämtliche Schläge als neugebildete Objekte ohne Vorgängerobjekte betrachtet. Über die einzelnen Jahre hinweg werden zwischen 64,8 % und 90,5 % der Schläge einer zu integrierenden Zeitscheibe als geometrisch unveränderte Fortführung eines bereits im Informationssystem abgebildeten Objekts interpretiert. Ein weiterer Anteil von 3,1 % bis 10,2 % der Objekte einer zu integrierenden Zeitscheibe lässt sich als geometrisch leicht veränderte Fortführung von bereits im System abgebildeten Schlagobjekten klassifizieren. Insgesamt bewegt sich damit der Anteil an Schlägen je Zeitscheibe, die eine Fortführung von bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten darstellen, in einem Bereich von 73,1 % bis 93,7 %. Eine Zusammenstellung der jährlichen Anteile von Fortführung und Neubildung findet sich in Tabelle 3. Im Gegensatz zu Feldstücken weisen Schläge damit eine größere Häufigkeit von objektbildenden Veränderungen auf. Entsprechend nehmen Objektbildungen eine gewichtigere Rolle ein. Für eine Betrachtung der absoluten Zahlen sei auf Tabelle 5 des Anhangs (Abschnitt B.1) verwiesen.

Die flächendeckende Verfügbarkeit der Geometrie von Schlagobjekten ab der Zeitscheibe 2015 tritt durch den auffallend hohen Anteil von Objektneubildungen ohne jeweilige Vorgängerobjekte im Informationssystem deutlich hervor. Ab diesem Zeitpunkt nehmen insbesondere auch Zusammenlegungen und Abspaltungen deutlich größere Anteile ein. Der Bruch ab 2015 gegenüber den Vorjahren ist offensichtlich.

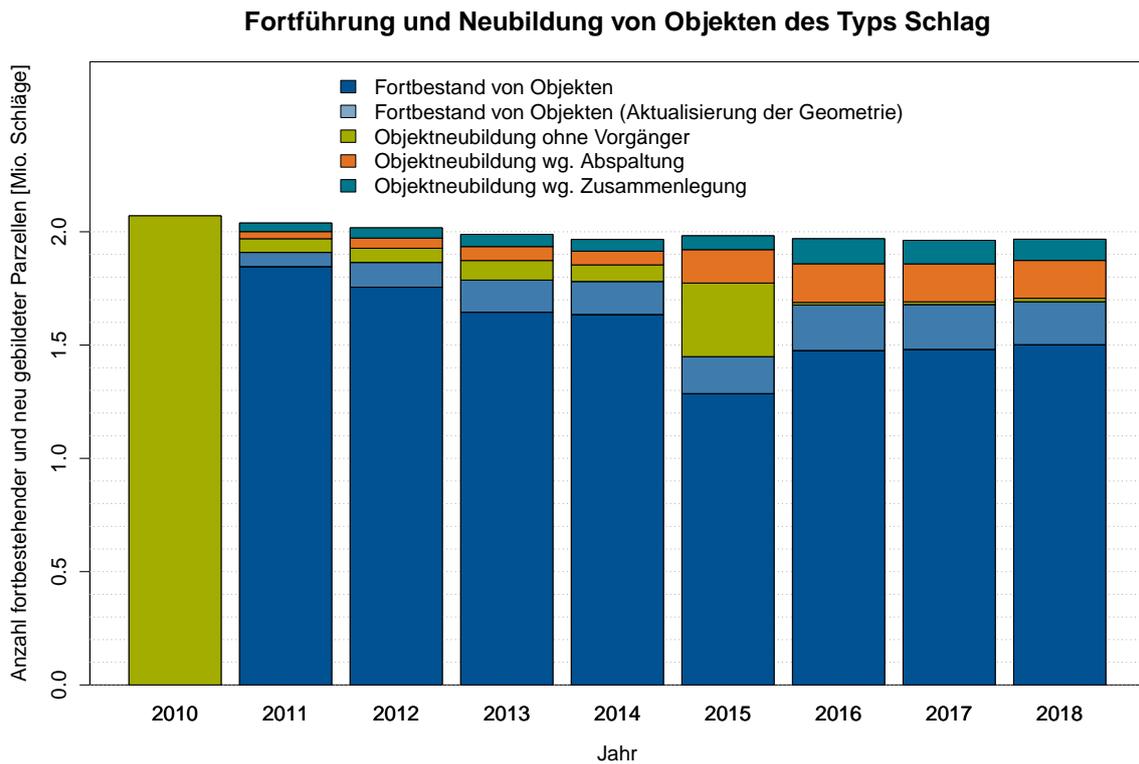


Abbildung 38: Darstellung der zeitlichen Stabilität von Schlagobjekten; die Jahresangaben beziehen sich auf die ins Informationssystem integrierten Zeitscheiben

Tabelle 3: Relative Anteile der Fortführung und Neubildung von Schlägen bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben

	Jahr der integrierten Zeitscheibe									
	2010 [%]	2011 [%]	2012 [%]	2013 [%]	2014 [%]	2015 [%]	2016 [%]	2017 [%]	2018 [%]	
Fortbestand (identische Geometrie)	-	90,5	87,0	82,7	83,1	64,8	74,9	75,4	76,3	
Fortbestand (Geometrieupdate)	-	3,1	5,4	7,1	7,5	8,3	10,3	10,1	9,7	
Fortbestand gesamt	-	93,7	92,4	89,9	90,6	73,1	85,2	85,6	86,0	
Objektneubildung ohne Vorgänger	100,0	2,9	3,1	4,3	3,7	16,4	0,6	0,6	0,8	
Objektneubildung wg. Abspaltung	-	1,5	2,2	3,1	3,1	7,4	8,7	8,5	8,5	
Objektneubildung wg. Zusammenlegung	-	1,9	2,2	2,7	2,6	3,1	5,6	5,3	4,8	
Neubildung gesamt	100,0	6,3	7,6	10,1	9,4	26,9	14,8	14,4	14,0	

Auch in der beobachteten, zeitlichen Gültigkeit der Schläge ist die flächendeckende Verfügbarkeit von Geometrieattributen ab dem Jahr 2015 sichtbar (Abbildung 39). So besitzen lediglich 73,5 % der Schläge, die am 01.06.2014 existieren auch noch Gültigkeit nach ei-

nem Jahr. Nach drei Jahren existieren noch 62,7 % der Schläge, die zum 01.06.2014 gültig sind. Von Schlägen, die am 01.06. der Jahre 2015, 2016 und 2017 existieren, sind zwischen 84,4 % und 86,0 % auch noch nach einem Jahr vorhanden. 70,2 % der 1 982 238 Schläge mit Gültigkeit am 01.06.2015 sind auch nach mehr als drei Jahren noch existent.

Die beobachtete bzw. erwartete Lebensdauer von Objekten des Typs Schlag liegt damit insgesamt unterhalb der beobachteten Lebensdauer von Feldstücken. Eine Grundlegende Ursache dürfte darin liegen, dass die Schlaggestaltung innerhalb von Feldstücken deutlich stärker der Entscheidungen eines Landwirts unterliegt als dies bei Feldstücken der Fall ist.

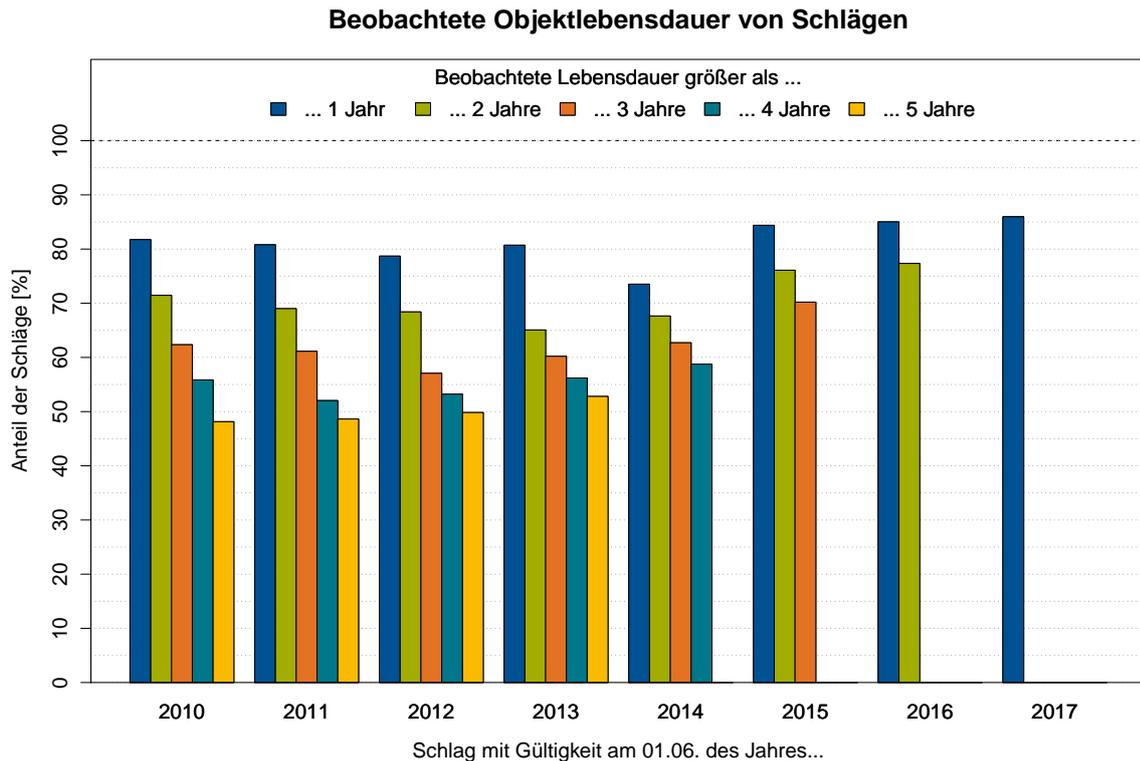


Abbildung 39: Beobachtete zeitliche Gültigkeit von Objekten des Typs Schlag nach verschiedenen Zeitintervallen

6.5.2 Rekonstruktion eines Zustands der Realwelt zu einem beliebigen Zeitpunkt der Vergangenheit

Das entwickelte Informationssystem ermöglicht für die abgebildeten Objektarten die Rekonstruktion von Objekten und Objektzuständen zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit. Dazu sind die Objekte und Objektzustände zum betrachteten Zeitpunkt zu selektieren und zusammenzuführen. Diese Zusammenführung ist innerhalb des Informationssystems in Form einer Datenbanksicht je darin abgebildeter Objektart umgesetzt. Listing 9 zeigt beispielhaft den SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Sicht für die Rekonstruktion von Zuständen von Objekten des Typs *Schlag*. Entsprechende Sichten sind für sämtliche der im Modell abgebildeten Objektarten verfügbar.

```

1 CREATE VIEW "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcelAtTimeInstant"
2 AS
3 SELECT DISTINCT ap.oid,
4     apg.oid AS "oidGeometry",
5     apg.geometry,
6     apc.oid AS "oidCrop",
7     apc."cropCode",
8     apc."cropName",
9     apc."cropType",
10    apc."cropArea",
11    apc."cropAreaUnit",
12    apc."cropStatus",
13    apipofb.oid AS "oidAgriculturalParcelsPartOfFarmerBlock",
14    apipofb."id_farmerBlock",
15    m.oid AS "oid_ManagementAgriculturalParcel",
16    m.id_farm "id_farm",
17    LEAST(
18        ap."validTo",
19        apg."validTo",
20        apc."validTo",
21        apipofb."validTo",
22        m."validTo") AS "validToAbs",
23    GREATEST(ap."validFrom",
24        apg."validFrom",
25        apc."validFrom",
26        apipofb."validFrom",
27        m."validFrom") AS "validFromAbs"
28 FROM "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" ap
29     LEFT JOIN "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_geometry" apg
30         ON ap.oid = apg."id_agriculturalParcel"
31     LEFT JOIN "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_crop" apc
32         ON ap.oid = apc."id_agriculturalParcel"
33     LEFT JOIN "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcelsPartOfFarmerBlock" apipofb
34         ON ap.oid = apipofb."id_agriculturalParcel"
35     LEFT JOIN "AgriculturalLandUse"."Management_AgriculturalParcel" m
36         ON m."id_agriculturalParcel" = ap.oid
37
38 WHERE LEAST(
39     ap."validTo",
40     apg."validTo",
41     apc."validTo",
42     apipofb."validTo",
43     m."validTo")
44     >= GREATEST(ap."validFrom",
45     apg."validFrom",
46     apc."validFrom",
47     apipofb."validFrom",
48     m."validFrom");

```

Listing 9: SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Datenbanksicht für die Rekonstruktion von Objekten des Typs Schlag zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit

Die Tabelle *AgriculturalParcel* (Zeile 28) repräsentiert darin die Objekte vom Typ *Schlag* einschließlich ihrer jeweiligen Objektlebensdauer. Zur Rekonstruktion von Objektzuständen für einen Zeitpunkt der Vergangenheit sind die Objekte mit ihren jeweiligen Attributzuständen

zu verknüpfen. Diese Attributzustände sind mit dem jeweiligen Lebenszeitintervall für jedes Attribut in einer eigenständigen Tabelle abgebildet. Im Beispiel ist die Geometrie des Schlags in der Tabelle *agriculturalParcel_geometry* (Zeile 29) und die Angaben zur angebauten Kultur in der Tabelle *agriculturalParcel_crop* (Zeile 31) enthalten. Zusätzlich bestehen für Objekte vom Typ *Schlag* zeitlich begrenzt gültige Beziehungen zu Feldstücken und bewirtschaftenden Betrieben. Diese Beziehungen sind im logischen Datenmodell als Zwischentabellen mit zeitlich begrenzt gültigen Verweisen von Schlagobjekten auf Feldstücke (Zeile 33) bzw. landwirtschaftliche Betriebe (Zeile 35) abgebildet. Sämtliche mit der Schlagtabelle zu verknüpfenden Tabellen besitzen neben Angaben zur jeweiligen zeitlichen Gültigkeit Fremdschlüsselverweise auf den Primärschlüssel der Objektartentabelle von Schlägen, über welche eine Zusammenführung (`LEFT JOIN`) erfolgen kann (Zeilen 30, 32, 34 und 36).

Der Zustand eines Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt der Vergangenheit entspricht der Konstellation der zu einem bestimmten Zeitpunkt gültigen Attributzustände. Die Lebensdauer einer Zustandskonstellation ist durch die größte zeitliche Untergrenze und die kleinste zeitliche Obergrenze des Lebenszeitintervalls eines der beteiligten Komponenten/Attribute bestimmt (Zeilen 17 bis 21 und 22 bis 26). Für die Erzeugung der Sicht werden aus der Ergebnismenge diejenigen Konstellationen/Tupel selektiert, deren Lebenszeitbeginn vor dem Ende der Lebensdauer liegt (Zeilen 38 bis 47).

Soll nun der Zustand von Objekten für einen Zeitpunkt der Vergangenheit rekonstruiert werden, so sind aus der jeweiligen Datenbanksicht diejenigen Tupel zu selektieren, bei denen der Beginn (Attribut *validFromAbs*) bzw. das Ende (Attribut *validToAbs*) des Lebenszeitintervalls einer Konstellation vor bzw. nach dem betrachteten Zeitpunkt liegt. Listing 10 zeigt dies beispielhaft anhand der Rekonstruktion des Zustandes von Objekten des Typs *Schlag* zum Stichtag 01.06.2013. Die entsprechende Selektion erfolgt in Zeile 12. Zur Vereinfachung sind die Identifikatoren der Attribute nicht Bestandteil der Ausgabe.

```

1 SELECT DISTINCT oid,
2     geometry,
3     "cropCode",
4     "cropName",
5     "cropType",
6     "cropArea",
7     "cropAreaUnit",
8     "cropStatus",
9     "id_farmerBlock",
10    "id_farm"
11 FROM "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcelAtTimeInstant"
12 WHERE "validFromAbs" <= '2013-06-01' and "validToAbs" >= '2013-06-01';

```

Listing 10: SQL-Ausdruck zur Selektion von Objekten vom Typ *Schlag* einschließlich des Objektzustands zum beispielhaften Stichtag 01.06.2013

Das Ergebnis dieser Abfrage ist in Abbildung 40 für ein zufällig ausgewähltes Objekt vom Typ *Schlag* in einer Karte dargestellt.

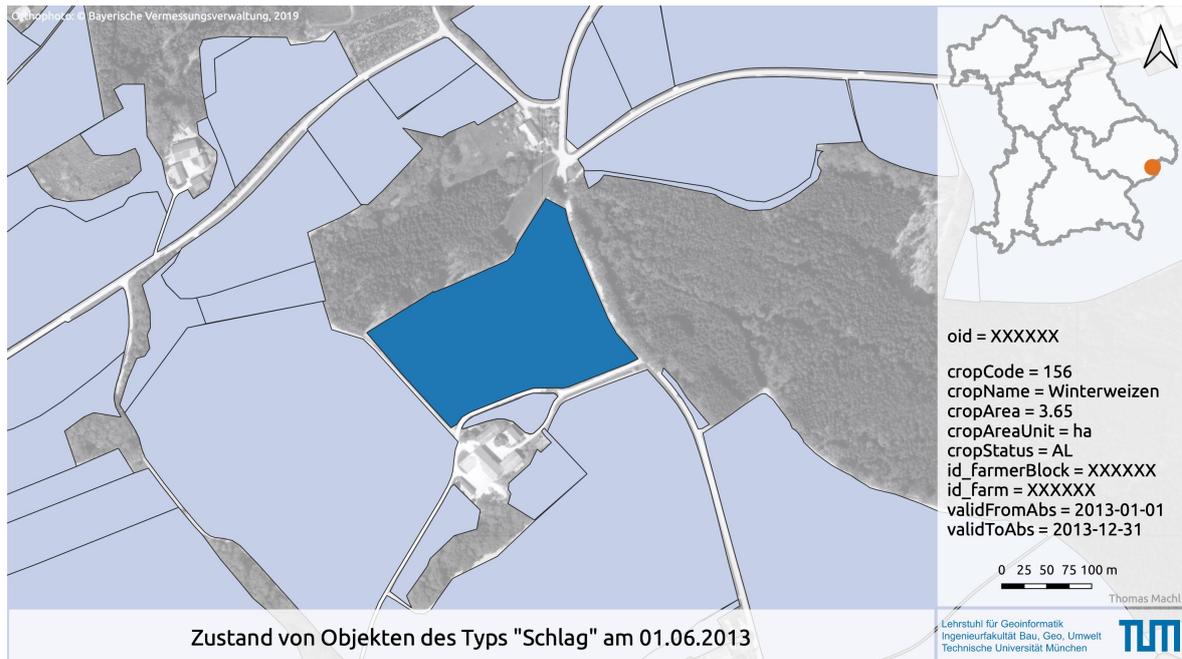


Abbildung 40: Zustand von Objekten vom Typ Schlag zum Zeitpunkt 01.06.2013 (Angaben zur Kulturart aus Gründen des Datenschutzes in der Visualisierung verändert)

6.5.3 Analyse von Attributzeitreihen für Einzelobjekte

Die Abbildung von Objekteigenschaften in Form von Attributzeitreihen bzw. Attributwertbelegungen mit jeweils zeitlich begrenzter Gültigkeit erlaubt für Einzelobjekte eine tiefgreifende Analyse von Zustandsveränderungen. So ist es beispielsweise möglich, für Objekte vom Typ *Schlag* eine Zeitreihe der darauf befindlichen Kulturen über die einzelnen Jahre anzugeben. Listing 11 zeigt den SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Sicht für die Ausgabe der Abfolge von Kulturen auf einzelnen Schlägen.

```

1 CREATE VIEW "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel_SequenceOfCrops"
2 AS
3 SELECT DISTINCT ON ("sequenceOfCrops".oid)
4     "sequenceOfCrops".oid,
5     "sequenceOfCrops"."validFrom",
6     "sequenceOfCrops"."validTo",
7     "sequenceOfCrops"."sequenceOfCrops",
8     apg.geometry,
9 FROM ( SELECT ap.oid,
10         ap."validFrom",
11         ap."validTo",
12         array_agg(ROW(c."validFrom",
13             c."validTo",
14             c."cropCode",
15             c."cropName",
16             c."cropArea",
17             c."cropAreaUnit")
18             ORDER BY c."validFrom" ASC) AS "sequenceOfCrops",
19 FROM "AgriculturalLandUse"."AgriculturalParcel" ap
20     JOIN "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_crop" c
21     ON ap.oid = c."id_agriculturalParcel"
22     GROUP BY ap.oid, ap."validFrom", ap."validTo") "sequenceOfCrops"
23 JOIN "AgriculturalLandUse"."agriculturalParcel_geometry" apg
24 ON apg."id_agriculturalParcel" = "sequenceOfCrops".oid
25 ORDER BY "sequenceOfCrops".oid, apg."validTo" DESC;
    
```

Listing 11: SQL-Ausdruck zur Erzeugung einer Datenbanksicht für die Rekonstruktion der Abfolge von Kulturen auf Objekten vom Typ Schlag

Die eigentliche Ableitung der Abfolge von Feldfrüchten erfolgt in der hier als *sequenceOfCrops* bezeichneten Unterabfrage (Zeilen 9 bis 22). Zunächst sind jedem Schlagobjekt die darauf im Laufe der Objektlebensdauer befindlichen Kulturen zuzuordnen. Zu diesem Zweck ist die Tabelle *AgriculturalParcel* mit den Objekten des Typs *Schlag* und die Tabelle *agriculturalParcel_crop* mit den zeitabhängigen Angaben zu den Kulturarten zusammenzuführen (Zeilen 19 bis 21). Die Verknüpfung erfolgt dabei über einen Fremdschlüsselverweis (Zeile 21). Mit Hilfe der PostgreSQL-Aggregationsfunktion `array_agg()` lässt sich aus der Abfolge der Kulturen ein Array erzeugen (Zeilen 12 bis 18). Die Gruppierung erfolgt dabei über den Objektidentifikator (Spalte *oid*) der Tabelle *AgriculturalParcel* sowie über den Beginn und das Ende des Lebenszeitintervalls eines Schlages (Spalten *validFrom* und *validTo*) (Zeile 22). Die im Array abgebildeten Elemente enthalten Angaben zur zeitlichen Gültigkeit des Vorhandenseins einer Kultur (Zeilen 12 und 13), Angaben zur Kulturart (Zeilen 14 und 15) sowie zur Fläche der angebauten Kultur (Zeilen 16 und 17). Innerhalb des Arrays werden die Elemente nach Beginn ihrer zeitlichen Gültigkeit aufsteigend sortiert (Zeile 18). Ergebnis der Unterabfrage sind somit Angaben zum Objektidentifikator des Schlages (Zeile 9), Angaben zum betrachteten Zeitintervall (Zeilen 10 und 11) sowie eine Zusammenstellung der Abfolge der Kulturen (Zeilen 12 bis 18).

Für die Visualisierung werden den einzelnen Schlagobjekten die jeweils letzten während der Objektlebensdauer gültigen Geometriezustände zugewiesen. Aus diesem Grund wird das Ergebnis der Unterabfrage *sequenceOfCrops* mit der Geometrietabelle der Schlagobjekte (Tabelle *agriculturalParcel_geometry*) verknüpft (Zeilen 23 und 24). Die Verknüpfung erfolgt wiederum über den Fremdschlüsselverweis der Geometrietabelle auf den Primärschlüssel der Tabelle mit den Schlagobjekten (Zeile 24). Um den einzelnen Schlägen den letzten in der Lebensdauer gültigen Geometriezustand zuzuweisen, wird das Ergebnis der Abfrage über das Ende der Gültigkeit eines Geometriezustands absteigend sortiert (Zeile 25) und für jeden Schlag über den Ausdruck `DISTINCT ON()` das erste Element der Ergebnismenge selektiert (Zeile 3).

Abbildung 41 zeigt das Ergebnis der Abfrage anhand einer zufällig ausgewählten Parzelle. Aus der zeitlichen Abfolge der einzelnen Kulturen könnten sich in einem nächsten Schritt durch Extraktion sich wiederholender Muster Fruchtfolgen ableiten lassen.

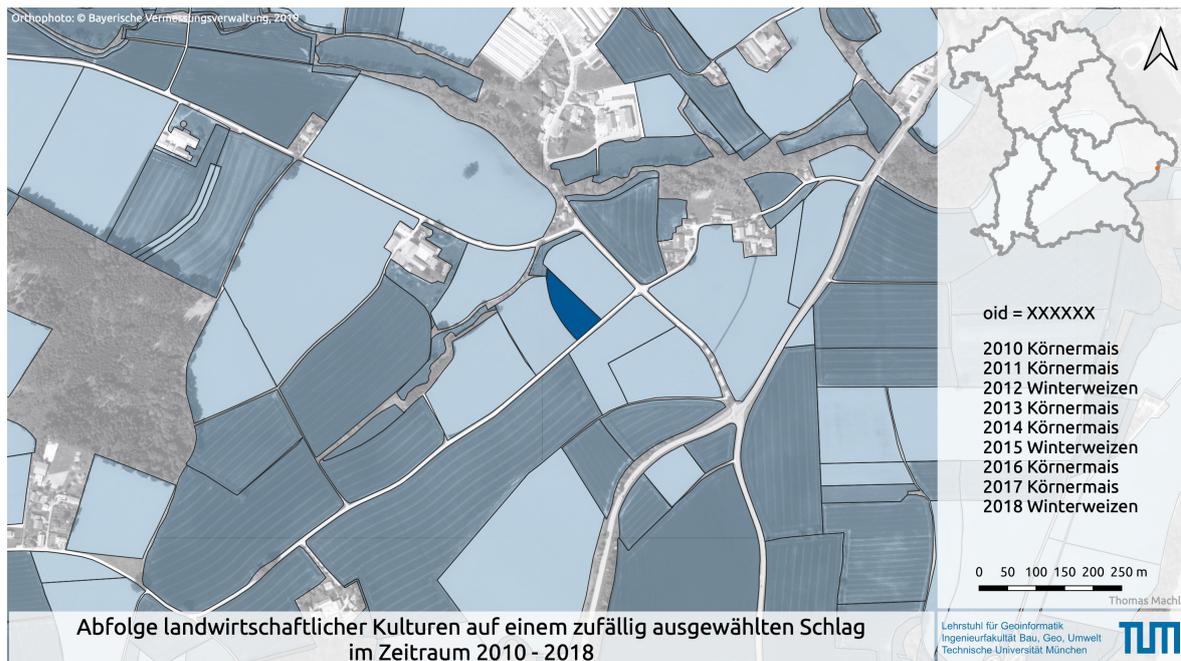


Abbildung 41: Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen auf einem zufällig ausgewählten Schlag im Zeitraum von 2010 bis 2018; aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Abbildung lediglich die Jahre der jeweiligen Kultur angegeben.

6.5.4 Übergangsbeziehungen zwischen Objekten der selben Art

Aufgrund der kleinteiligen Abbildung von zeitlichen Übergangsbeziehungen zwischen Objekten bzw. der Reallokation einzelner Geometriebestandteile sind die beobachteten und dokumentierten Übergänge unmittelbar für nachfolgende Analysen zugänglich. Abbildung 42 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt, in welchem sich zwischen den Zeitscheiben der Jahre 2017 und 2018 mehrere *Zusammenlegungen* von Feldstücken (Klasse *FarmerBlock*) ereignet haben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Abbildung lediglich die von einer *Zusammenlegung* betroffenen Konturen der Vorgänger- und Nachfolgerobjekte dargestellt. Diese lassen sich unmittelbar aus der Tabelle mit Übergangsbeziehungen ableiten.

Analog zur *Zusammenlegung* landwirtschaftlicher Parzellen lässt sich auch die *Abspaltung* einzelner Bereiche aus landwirtschaftlichen Parzellen auf Ebene von Einzelfragmenten erkennen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 43 dargestellt. Die Feldstücke (blaue Kontur) gehen als Nachfolger der Vorgänger (grüne Kontur) hervor. Für die Teilbereiche, die nicht mehr Bestandteil landwirtschaftlicher Parzellen sind (hier als grüne Kontur sichtbar), lassen sich weiterführende Analysen zu deren Verbleib anstellen (siehe Abschnitt 6.5.5)

Die kleinteilige Abbildung und Verortung objektübergreifender Veränderungen über die Zeit ermöglicht eine landesweite Sichtbarmachung von räumlichen Verteilungsmustern verschiedener Kategorien von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten. Zur landesweiten Visualisierung verschiedener Kategorien dienen im Folgenden sog. Heatmaps bzw. zweidimensionale Kerndichteplots.

Diese Art der Darstellung ermöglicht eine übersichtliche Visualisierung der räumlichen Dichte verschiedener Kategorien von Übergängen zwischen Objekten über die Zeit. Einzelne Übergangsereignisse werden dabei für die landesweite Betrachtung als punktförmige Phänomene betrachtet. Aus der räumlichen Verteilung von Ereignissen lässt sich anschließend

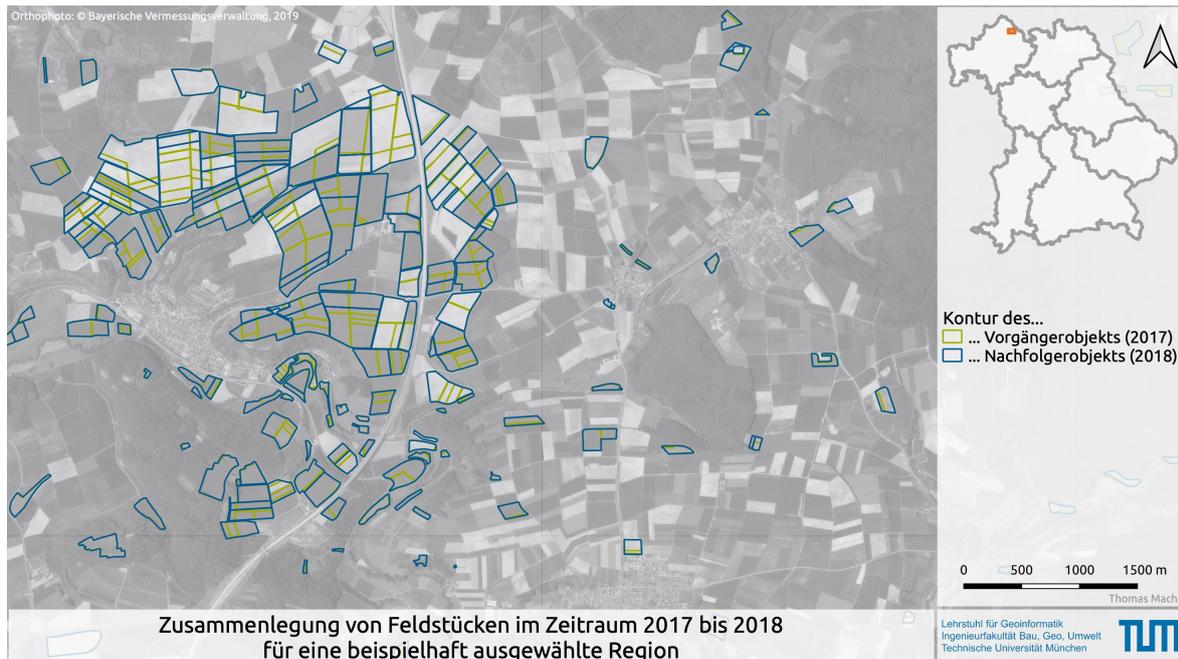


Abbildung 42: Beispielhafter Ausschnitt mit Zusammenlegung landwirtschaftlicher Parzellen (Objektart FarmerBlock) im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018

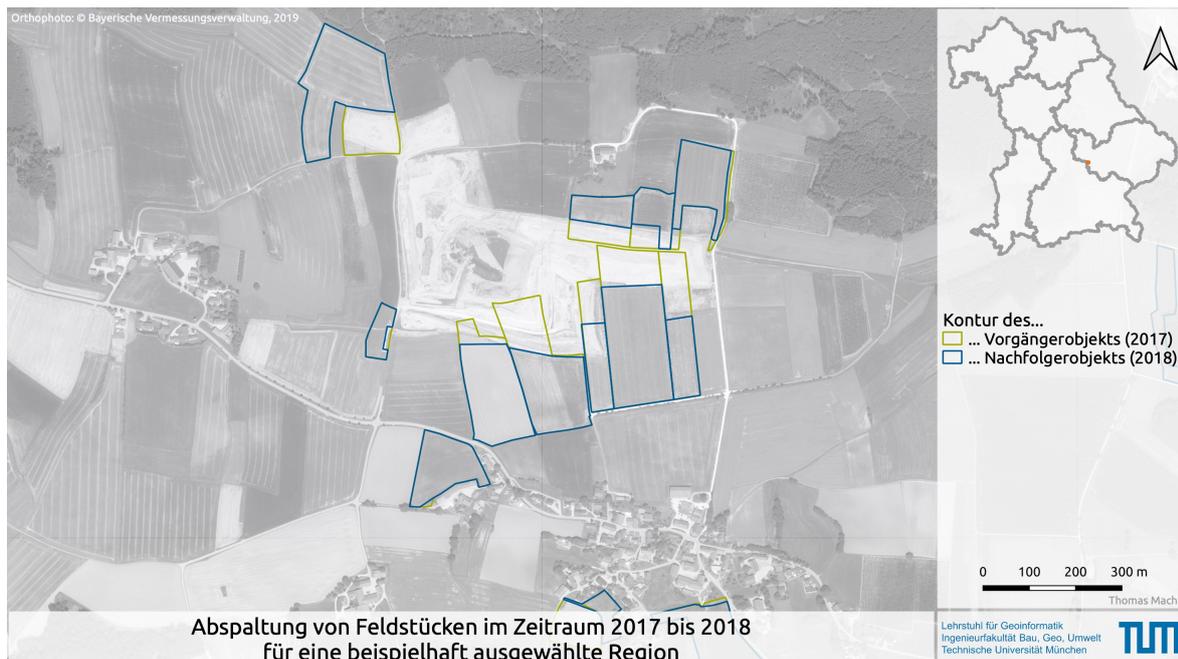


Abbildung 43: Beispielhafter Ausschnitt mit Abspaltung landwirtschaftlicher Parzellen (Objektart FarmerBlock) im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018

eine relative Punktdichte ableiten. Die Software *QGIS* verfügt dazu bereits über entsprechende Tools zur Erzeugung von Heatmaps.

Abbildung 44 zeigt das Ergebnis am Beispiel der *Zusammenlegung* von Feldstücken (Klasse *FarmerBlock*) im Übergang zwischen den Jahren 2017 und 2018. Zur Verortung von Veränderungsereignissen dienen die jeweiligen Zentroide der Nachfolgerobjekte, die sich aus den Übergangsbeziehungen ableiten lassen. Als Kernbandbreite wird ein Radius von

5 km genutzt. Regionen mit einer eher geringen räumlichen Dichte von Zusammenlegungsereignissen sind in der Abbildung blau, Regionen mit einer hohen räumlichen Dichte von Zusammenlegungsereignissen gelb dargestellt.

Die Form der Darstellung dient insbesondere dem Auffinden sog. *Hotspots* mit einer hohen räumlichen Dichte von Veränderungsereignissen. Bereiche mit einer hohen räumlichen Dichte könnten in aufbauenden Analysen näher betrachtet werden. Zusätzliche Abbildungen zur landesweiten Betrachtung verschiedener Kategorien zeitlicher Veränderung finden sich im Abschnitt B.2 des Anhangs.

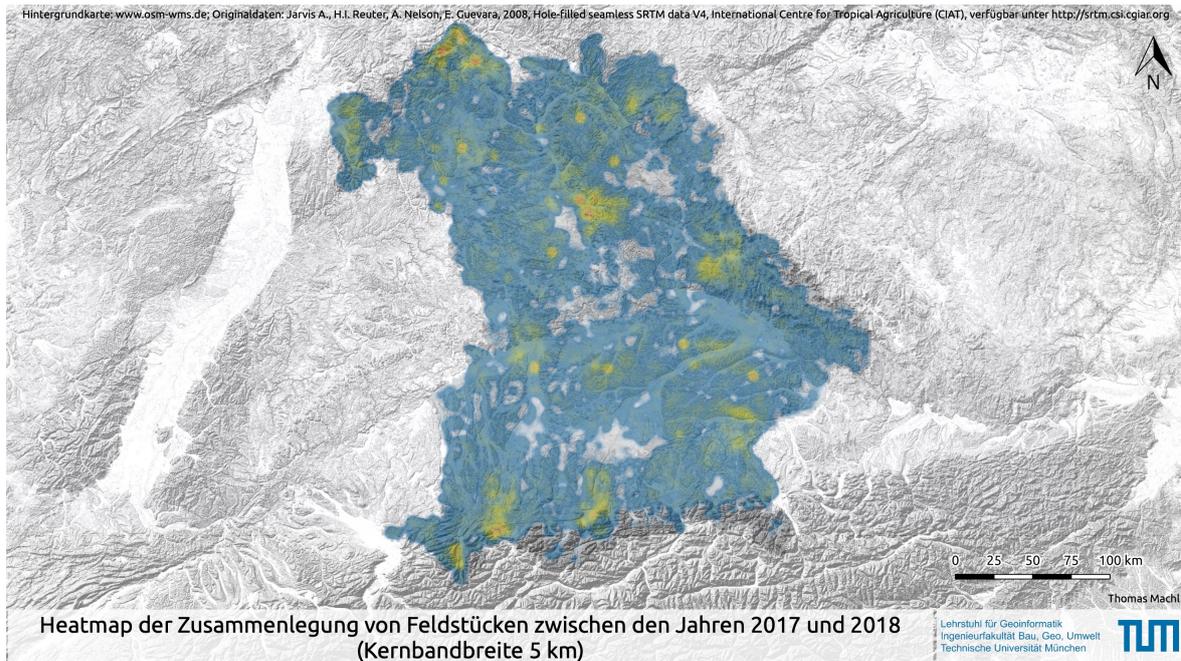


Abbildung 44: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018; die Kernbandbreite beträgt 5 km; Regionen mit einer geringen räumlichen Dichte sind in der Darstellung blau, Regionen mit einer hohen räumlichen Dichte gelb dargestellt

6.5.5 Übergangsbeziehungen zwischen Objekten unterschiedlicher Art

Die kleinteilige Abbildung objektübergreifender Veränderungen ermöglicht neben den in Abschnitt 6.5.4 gezeigten Analysen zu zeitlichen Übergangsbeziehungen zwischen Objekten einer Art auch die Analyse objektartenübergreifender Übergänge. Als objektartenübergreifend gelten dabei diejenigen Übergänge, bei denen sich die Objektart des Quell- und des Zielobjekts unterscheiden. Die folgenden beiden Abschnitte beleuchten einerseits die objektartenübergreifenden Übergänge zwischen Objektarten der Pakete *Vegetation*, *SettlementArea*, *TrafficArea* und *SurfaceWater* (Datenquelle jeweils TN) und andererseits die Übergänge zwischen landwirtschaftlichen Parzellen (Datenquelle LPIS) und Objektarten der genannten Objektartengruppen (Datenquelle TN).

6.5.5.1 Objektartenübergreifende Übergänge zwischen Objektarten der Pakete Vegetation, SettlementArea, TrafficArea und SurfaceWater

Mit einer jährlichen Gesamtfläche zwischen 35 501 ha und 44 682 ha – das entspricht etwa zwischen 0,5 % und 0,6 % der in der Tatsächlichen Nutzung abgebildeten Fläche (= Landesfläche Bayerns) – ist in den Jahren 2014 bis 2018 nur ein kleiner Bereich von objektartenübergreifenden Übergängen betroffen. Die Abbildungen 119 bis 122 in Abschnitt B.3 des Anhangs veranschaulichen dies anhand von Flächenbilanzen für die jährlichen Übergänge zwischen Objektarten in den Jahren 2014 bis 2018. Abbildung 45 greift diese objektartenübergreifenden Übergänge zwischen den Jahren 2017 und 2018 heraus und gibt Auskunft über Quellen und Senken sowie deren jeweilige Flächenanteile. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Objektarten, die mit einer Gesamtfläche von weniger als 1000 ha als Quelle oder Senke auftreten, der Kategorie *sonstige Objektart* zugeordnet. Die Farben geben in der Abbildung Aufschluss über die Objektartengruppe der jeweiligen als Senke fungierenden Objektart.

Neben einer rein flächenhaften Bilanzierung lassen sich die Übergänge zwischen Objektarten insbesondere auch landesweit lokalisieren. Zur Visualisierung der Übergänge zwischen Elementen der Objektart *Agriculture* (TN-Objektart *AX_Landwirtschaft*) und Objektarten der Pakete *SettlementArea* und *TrafficArea* (TN-Objektartengruppen *Siedlung* und *Verkehr*) zwischen den Jahren 2017 und 2018 dient in Abbildung 46 die Darstellungsform der flächengewichteten Heatmap. Einzelne Übergangsereignisse sind über die von Übergangsbeziehungen betroffenen Fläche gewichtet. Als Kernbandbreite für die Ableitung der flächengewichteten Heatmap ist für die Darstellung ein Radius von 5 km eingestellt. Bei der landesweiten Betrachtung treten einige Bereiche hervor, in denen flächenmäßig umfassendere, objektartenübergreifende Übergangsbeziehungen zwischen Objektarten auftreten.

Aufgrund der kleinteiligen Abbildung lassen sich objektartenübergreifende Übergangsbeziehungen auch detailliert räumlich hochauflösend betrachten. Abbildung 47 zeigt dies beispielhaft anhand der objektartenübergreifenden Übergänge von Objekten des Typs *Agriculture* (TN-Objektart *AX_Landwirtschaft*) zu Objektarten der Pakete *SettlementArea* und *TrafficArea* (TN-Objektartengruppen *Siedlung* und *Verkehr*) zwischen den Jahren 2017 und 2018 für einen geografischen Ausschnitt nördlich von Buchloe. Die Übergänge sind in der Karte kategorisiert nach der als Senke fungierenden Objektart dargestellt. Für diesen geografischen Ausschnitt lassen sich insbesondere größere flächenhafte Übergänge von landwirtschaftlichen Flächen hin zu Industrie- und Gewerbeflächen, Wohnbauflächen sowie zu Flächen für Sport-, Freizeit und Erholung beobachten.

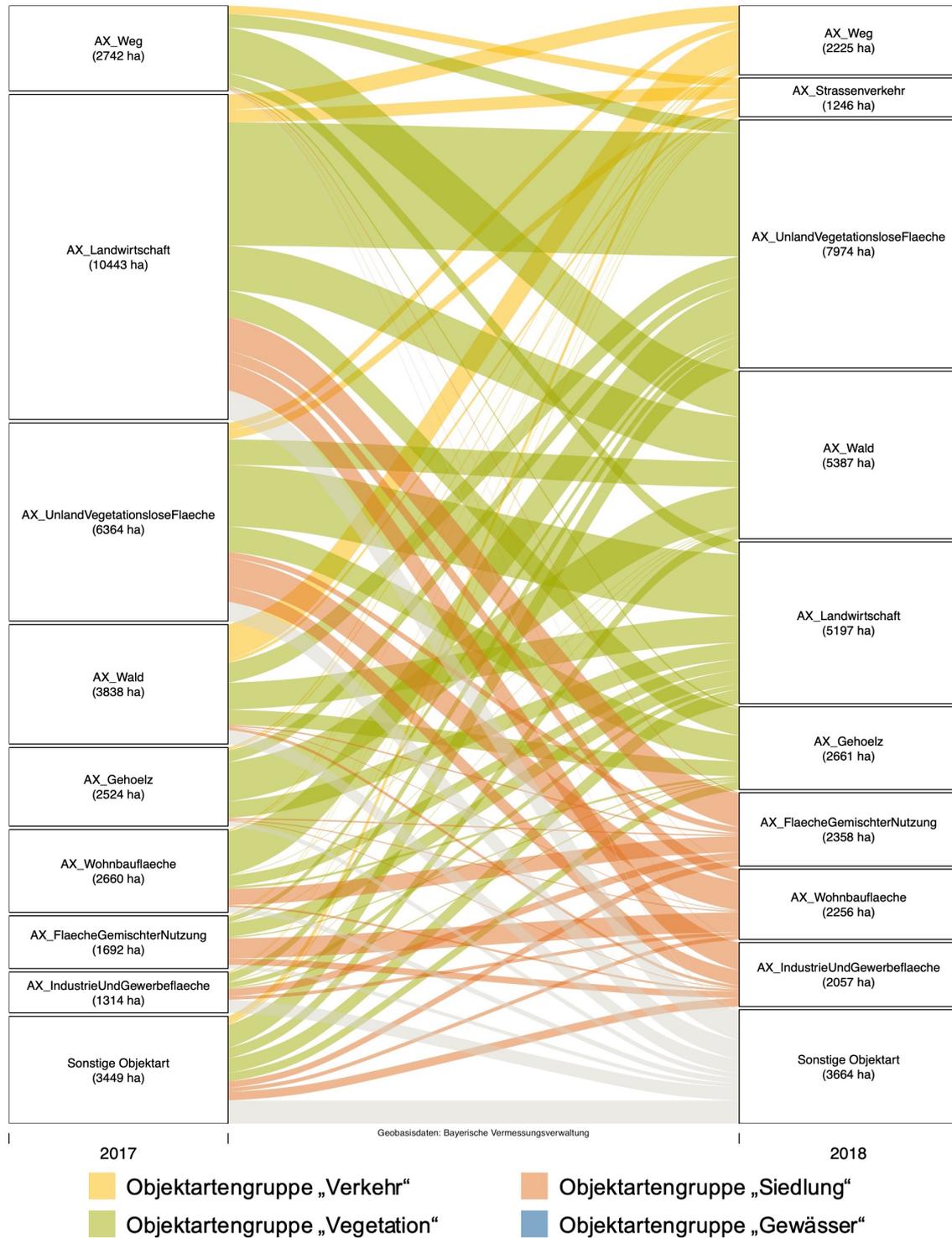


Abbildung 45: Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektklassen der Pakete Vegetation, SettlementArea, TrafficArea und SurfaceWater (Datenquelle TN) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 18.5.2018; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

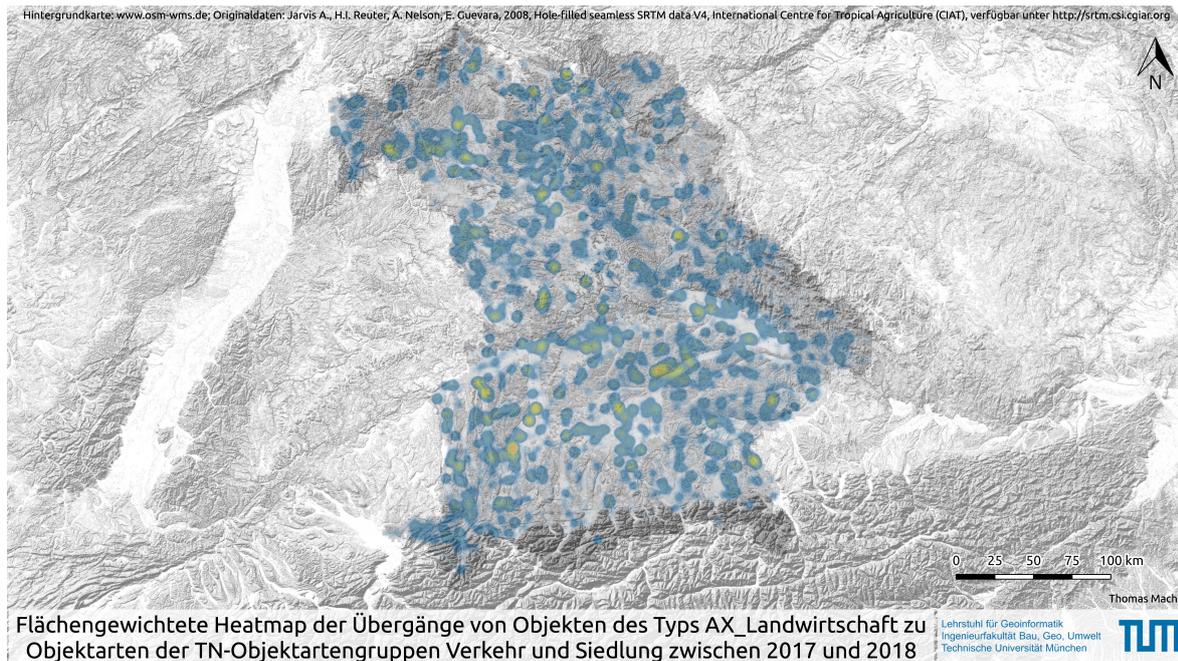


Abbildung 46: Flächengewichtete Heatmap objektartenübergreifender Übergangsbeziehungen von Objekten des Typs Agriculture (TN-Objektart AX_Landwirtschaft) zu Objektarten der Pakete SettlementArea und TrafficArea (TN-Objektartengruppen Siedlung und Verkehr) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018; die Gewichtung von Punkten erfolgt dabei über die Flächen der Geometriefragmente; die Kernbandbreite für die Visualisierung in der Heatmap beträgt 5km

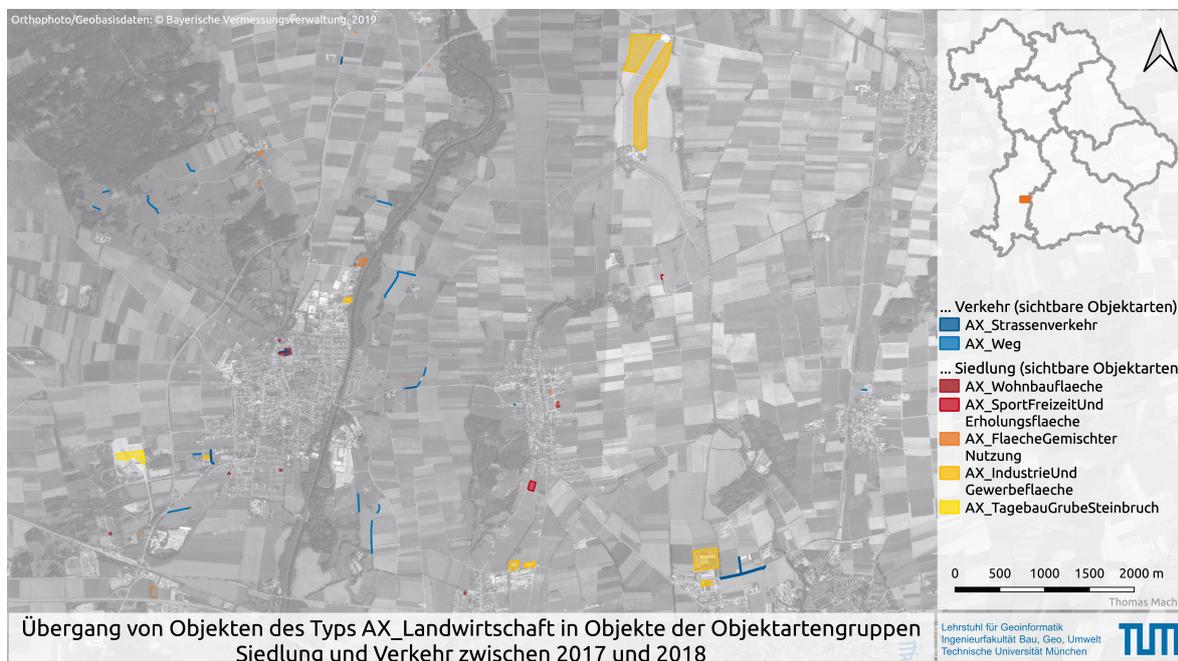


Abbildung 47: Geometrische Ausdehnung objektartenübergreifender Übergänge zwischen Elementen vom Typ Agriculture (TN-Objektart AX_Landwirtschaft) und Objekten der Pakete SettlementArea und TrafficArea (TN-Objektartengruppen Siedlung und Verkehr) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018

6.5.5.2 Objektartenübergreifende Übergänge zwischen Feldstücken und Objektarten der Pakete Vegetation, SettlementArea, TrafficArea und SurfaceWater

Analog zu den in Abschnitt 6.5.5.1 gezeigten Analysen von objektartenübergreifenden Übergängen zwischen unterschiedlichen Objektarten einer Datenquelle lassen sich auch Übergangsbeziehungen zwischen Objektarten unterschiedlicher Datenbestände betrachten und analysieren. Beispielhaft ist dies in Abbildung 48 anhand der Übergänge von landwirtschaftlichen Parzellen (Objektart *FarmerBlock*; Datenquelle LPIS) in Objektarten der Pakete *Vegetation*, *SettlementArea*, *TrafficArea* und *SurfaceWater* (Datenquelle jeweils TN) dargestellt. Zur Analyse dieser Übergänge sind die Geometriefragmente, die beim Übergang zwischen Objekten des Typs *FarmerBlock* nicht mehr Bestandteil eines Nachfolgeobjekts des selben Typs sind, mit den zum jeweiligen Zeitpunkt gültigen Objekten der genannten Objektarten räumlich zu verschneiden. Im gezeigten Beispiel werden Teile von Parzellen für den Bau bzw. die Erschließung von Windkraftanlagen der landwirtschaftlichen Nutzung entzogen.

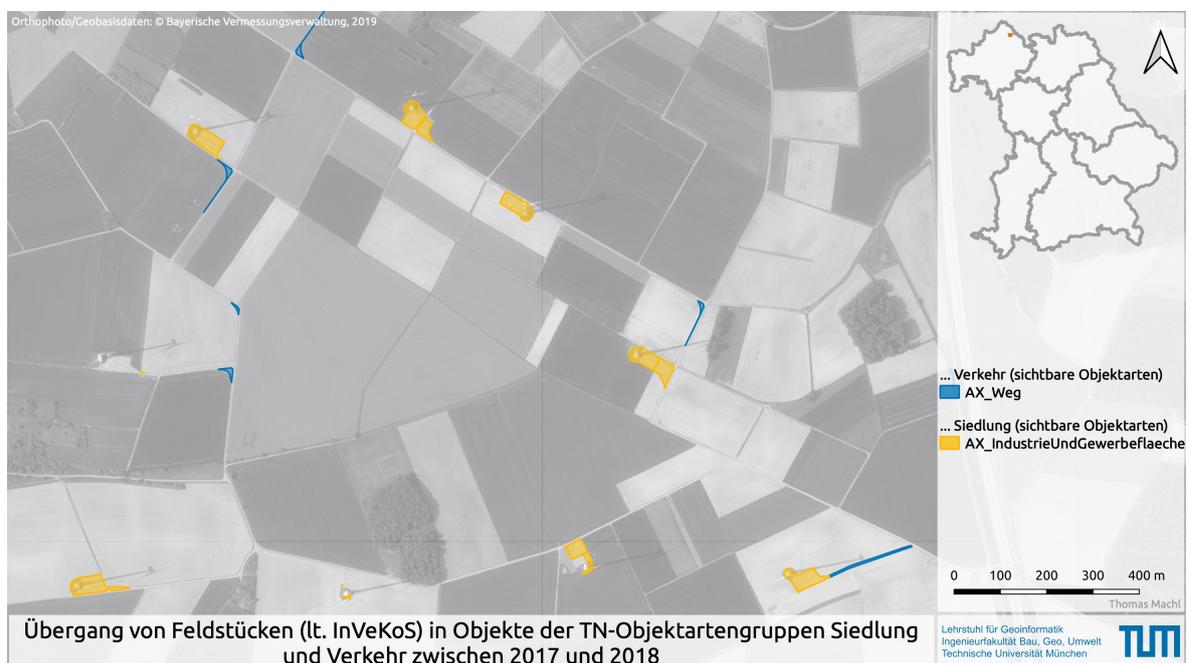


Abbildung 48: Geometrische Ausdehnung objektartenübergreifender Übergänge zwischen landwirtschaftlichen Parzellen vom Typ *FarmerBlock* (Datenquelle: LPIS) und Objektarten der Pakete *SettlementArea* und *TrafficArea* (Datenquelle: TN-Objektartengruppen *Siedlung* bzw. *Verkehr*) im Zeitraum von 26.05.2017 bis 26.05.2018

Bei der Betrachtung objektartenübergreifender Veränderungen über Objekte verschiedener Datenquellen hinweg besteht im Allgemeinen die Einschränkung, dass aufgetretene Übergänge zwischen Objektarten in unterschiedlichen Datenbeständen nicht synchron nachgeführt werden. So könnte beispielsweise der Fall auftreten, dass Teilbereiche landwirtschaftlicher Parzellen zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr Bestandteil einer LPIS-Zeitscheibe sind, diese Veränderung jedoch nicht zeitsynchron in einer anderen Datenquelle (hier TN) nachgeführt ist. Entsprechend sind objektartenübergreifende Übergangsbeziehungen zwischen Objekten unterschiedlicher Quellen nur bedingt nachvollziehbar und entsprechende Analysen nur eingeschränkt belastbar.

6.5.6 Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Einblick in die zur Integration zusätzlicher Zeitscheiben von Objekten der TN-Objektartengruppen *Gewässer*, *Verkehr*, *Siedlung* und *Vegetation*, der Daten des InVeKoS (Feldstücke, Schläge, Agrarumwelt- und Vertragsnaturschutzmaßnahmen) sowie der Daten zu Flurstücksobjekten mittels ETL-Prozessen benötigten Rechenzeiten. Darüber hinaus werden auch die Laufzeiten für die Rekonstruktion von Objektzuständen zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit betrachtet.

6.5.6.1 Beobachtete Laufzeiten für die Integration zusätzlicher Zeitscheiben in das LandModell^{TUM}-Informationssystem

Die Prozesse zur Integration zusätzlicher Zeitscheiben der genutzten Datensätze sind als eigenständige FME-Workspaces umgesetzt. Innerhalb dieser Workspaces erfolgt, wie in Abschnitt 6.4 erläutert, eine umfassende Validierung der Eingangsdaten, eine Extraktion bereits im System abgebildeter Objekte aus neuen Zeitscheiben, eine Überprüfung möglicher Zustandsveränderungen sowie die Ableitung und Dokumentation von Übergangsbeziehungen zwischen Objekten. Im Falle der Daten des InVeKoS erfolgt zudem eine umfassende Bereinigung der Eingangsdaten von Artefakten. Für die FME-Workspaces lassen sich bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben folgende Ausführungszeiten beobachten:

- **Objektarten und -beziehungen des LPIS bzw. InVeKoS** (ca. 1,8 Mio. Feldstücke, 2,0 Mio. Schläge, 1,0 bis 1,6 Mio. Agrarumwelt- bzw. Vertragsnaturschutzmaßnahmen, 0,1 Mio. Betriebe je zu integrierender Zeitscheibe):
12 h 30 min bis 20 h 5 min
- **Objektartengruppen der TN**
 - **Gewässer** (0.3 - 0.4 Mio. Objekte je zu integrierender Zeitscheibe):
39 min bis 50 min
 - **Verkehr** (1.4 - 1.5 Mio. Objekte je zu integrierender Zeitscheibe):
3 h 40 min bis 6 h 20 min
 - **Siedlung** (1.3 - 1.4 Mio. Objekte je zu integrierender Zeitscheibe):
3 h 5 min bis 4 h 30 min
 - **Vegetation** (3.0 - 3.3 Mio. Objekte je zu integrierender Zeitscheibe):
8 h 0 min bis 11 h 5 min
- **ALKIS[®]-Flurstücksobjekte** (10.6 Mio. Objekte je zu integrierender Zeitscheibe):
18 h 10 min bis 27 h 30 min

Die genannten Ausführungszeiten variieren stark in Abhängigkeit der je Zeitscheibe beobachteten Änderungen und Zustandsveränderungen gegenüber den im Datenbanksystem bereits abgebildeten Objektzustände. Im Falle der Daten des LPIS bzw. InVeKoS bedingen insbesondere die Bereinigung der Eingangsdaten von Artefakten sowie die durchgeführte Konsistenzsicherung im Vergleich zu den übrigen Datenquellen höhere Ausführungszeiten.

6.5.6.2 Performanz beim Zugriff auf Objekte des Informationssystems

Zur Beurteilung der Performanz beim Zugriff auf die im Datenbanksystem abgebildeten Objekte werden über *pgAdmin* für jede Objektart die Zustände von 30 Objekten zu verschiedenen Zeitpunkten rekonstruiert. Die Rekonstruktion von Zuständen von Einzelobjekten erfolgt über je eine Datenbankabfrage an die datenbankseitig für jede Objektart vorgehaltenen Datenbanksichten zur Rekonstruktion historischer Zustände. Für die Wiederherstellung von Feldstücken, Schlägen, Agrarumwelt- und Vertragsnaturschutzmaßnahmen (einschließlich der jeweiligen Beziehungen zueinander) sowie auch für die Rekonstruktion von Objekten vom Typ Gewässer, Siedlung, Vegetation, Verkehr und Flurstück ergeben sich in *pgAdmin* Laufzeiten von je ca. 15 ms. Dabei ist hervorzuheben, dass jedes der in den Objektarten abgebildeten Attribute als zeitvariabel (= eine mit dem Objekt zu verknüpfende Tabelle je Attribut) im Datenbanksystem abgebildet ist.

Neben der Performanz der Rekonstruktion von Einzelobjekten wird auch die Performanz für die landesweite Wiederherstellung des Zustands sämtlicher Objekte einer Art zu einem Zeitpunkt geprüft. Dazu wird für die grundlegenden Objektarten innerhalb des Informationssystems auf Basis der jeweiligen Datenbanksichten eine Datenbanktabelle des Objektzustands zu einem bestimmten Zeitpunkt der Vergangenheit erzeugt. Dabei lassen sich folgende Ausführungszeiten beobachten:

- **Landwirtschaftliche Flächennutzung**
 - **Feldstücke** (1.8 Mio. Objekte mit je 10 zeitlich variablen Attributen):
3 min 17 s
 - **Schläge** (2.0 Mio. Objekte mit je 9 zeitlich variablen Attributen):
3 min 55 s
- **Nutzung der Erdoberfläche**
 - **Gewässer** (0,4 Mio. Objekte mit je 8 zeitlich variablen Attributen):
16 s
 - **Verkehr** (1,5 Mio. Objekte mit je 10 zeitlich variablen Attributen):
1 min 21 s
 - **Siedlung** (1,4 Mio. Objekte mit je 9 zeitlich variablen Attributen):
1 min 2 s
 - **Vegetation** (3,3 Mio. Objekte mit je 7 zeitlich variablen Attributen):
3 min 5 s
- **Flurstücke** (10,6 Mio. Objekte mit je 9 zeitlich variablen Attributen):
8 min 31 s

6.6 Diskussion des entwickelten Ansatzes

Dieses Kapitel demonstriert anschaulich, dass sich auf Grundlage des LandModell^{TUM} eine landesweit flächendeckende, raumzeitliche und gleichzeitig skalenübergreifende Abbildung der Kulturlandschaft realisieren lässt. Dabei adressiert das LandModell^{TUM} die verschiedenen Facetten einer zeitlichen Fortentwicklung einzelner Komponenten und bildet diese konsistent, kleinteilig und homogen in einem Modell ab. Die abgebildeten Facetten der zeitlichen Entwicklung von Bestandteilen der Kulturlandschaft betreffen:

1. die Rekonstruktion von historischen Zuständen einzelner Objekte
2. die Analyse von Zustandsveränderungen einzelner Objekte sowie
3. die Betrachtung von objekt- bzw. objektartenübergreifenden Übergängen zwischen Objekten über die Zeit

Dem Aufbau des Informationssystems liegen mehrjährige, landesweit flächendeckend verfügbare Geodaten unterschiedlicher Quellen zugrunde, die in die Struktur des LandModell^{TUM} überführt werden. Hierzu zählen die *landwirtschaftliche Flächennutzung* (Datenquelle: InVeKoS), die *Flurstücke* (Datenquelle: DFK bzw. ALKIS[®]) sowie die verschiedenen Formen einer *Nutzung der Erdoberfläche* (Datenquelle: TN-Objektartengruppen Siedlung, Gewässer, Vegetations und Verkehr).

Eine grundlegende Herausforderung im Hinblick auf den Aufbau des Informationssystems besteht dabei in der Notwendigkeit einer nachträglichen Ableitung von Lebensdauern, Zustandsveränderungen und Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit aus einer Sequenz aufeinanderfolgender Schnappschüsse verschiedener Datenbestände. Für den Aufbau des Informationssystems ist es daher erforderlich, die bereits im Informationssystem abgebildeten Objekte mit den Elementen einer zu integrierenden Zeitscheibe abzugleichen und dabei einander entsprechende, untergehende und auch entstehende Objekte zu erkennen und als solche zu klassifizieren. Diese Klassifikation von Objekten bildet die Voraussetzung sowohl für die Erkennung und Dokumentation von Zustandsveränderungen als auch für die Beschreibung objektübergreifender Übergangsbeziehungen zwischen untergehenden und entstehenden Objekten. Die Extraktion von bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten aus einer zu integrierenden Zeitscheibe erfolgt anhand klar festgelegter Objektbildungsregeln. Diese Objektbildungsregeln legen fest, bis zu welchem Grad an Veränderung zwei Objekte als identisch einzuordnen sind. Als grundlegende Kriterien für die Extraktion bereits im Informationssystem abgebildeter Objekte in zu integrierenden Zeitscheiben gelten im LandModell^{TUM} einerseits die Zugehörigkeit der Objekte zu einer semantischen Klasse sowie andererseits die räumliche Ausdehnung der betreffenden Geoobjekte. Vor dem Hintergrund der Nutzung von Objekten des LandModell^{TUM} als Bezugsobjekte zur Anreicherung um zusätzliche Information verschiedener Fachbereiche liegt ein großes Augenmerk auf einer nach Möglichkeit langfristigen Aufrechterhaltung der Lebensdauer von Objekten. Entsprechend werden im LandModell^{TUM} Methoden entwickelt, welche sich bei der Klassifikation identischer Objekte in aufeinanderfolgenden Schnappschüssen unempfindlich gegenüber für die Objektbildung irrelevanten, geometrischen Unterschieden verhalten. Die maximal zulässige geometrische Abweichung zwischen zwei als identisch zu klassifizierende Objekte lässt sich dabei über einen nutzerdefinierbaren Toleranzbereich festlegen. Wie die Untersuchungen zu Feldstücken und Schlägen zeigen, lässt sich dadurch bei einem Toleranzbereich von maximal 6 m für ca. 9 % bzw. 8 % der Objekte einer zu integrierenden Zeitscheibe die Lebensdauer von Objekten trotz geometrischer Unterschiede zu bereits im Informationssystem abgebildeten Elementen aufrechterhalten. Eine ausführliche Betrachtung der zeitlichen Stabilität von Objekten findet sich in Abschnitt 6.5.1.

Die Voraussetzung für die Abbildung von Zustandsveränderungen der Geometrie von Objekten bildet die Trennung von Objekt und Objektgeometrie, welche in bestehenden GIS durchaus unüblich ist. Im LandModell^{TUM} sind sämtliche Attribute grundsätzlich als versionierbar angelegt - so auch die Geometrie. Damit erfolgt die Abbildung historischer Objektzustände über eine Versionierung der Attributzustände. Diese Form der Abbildung ist im Hinblick auf die Implementierung von Integrationsprozessen relativ aufwändig, ermöglicht jedoch eine sehr große Flexibilität hinsichtlich weiterführender Analysen. So lassen sich beispielsweise

für Einzelobjekte Zeitreihenanalysen zu den Attributwertbelegungen durchführen. Erste Beispiele sind in diesem Abschnitt dargestellt. Für eine ausführliche Diskussion des Ansatzes sei an dieser Stelle insbesondere auch auf den Abschnitt 4 verwiesen.

Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit werden im Modell dokumentiert, klassifiziert und räumlich-semantic kleinteilig in Form von Einzelschicksalen einzelner Geometriefragmente beschrieben. Diese kleinteilige Abbildung der objektübergreifenden Übergangsbeziehungen eröffnet eine große Vielfalt weiterführender Analysen, die im Rahmen dieses Kapitels lediglich beispielhaft skizziert werden kann. Während sich die Analysen objektartenübergreifender Übergänge zwischen Objektarten einer Datenquelle als belastbar herausstellen, ergeben sich bei objektartenübergreifenden Übergängen zwischen Objektarten unterschiedlicher Datenquellen insbesondere aufgrund zumeist zeitlich nicht synchroner Fortschreibung der Datenbestände gewisse Schwierigkeiten. So könnte beispielsweise bei der Integration von Parzellen des InVeKoS zu einem bestimmten Zeitpunkt der Wegfall von geometrischen Parzellenbestandteilen beobachtet werden, welcher erst zu einem späteren Zeitpunkt im Datenbestand der TN nachgeführt wird. Um dieser Tatsache zu begegnen, werden für die hier dargestellte Implementierung des Informationssystems in den Tabellen mit objektartenübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten ungleichen Ursprungs lediglich die betroffenen Geometriebereiche und Fremdschlüsselverweise entweder auf die Quell- oder Zielobjekte eingetragen. Die Objektart, die beim objektartenübergreifenden Übergang für den jeweiligen Geometriebereich als Quelle oder Senke dient, lässt sich anschließend durch eine räumliche Verschneidung mit den Objektarten der jeweils anderen Datenquelle ermitteln.

Mit der Notwendigkeit einer rückwärtigen Ableitung von Objektlebensdauern, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergängen aus Abfolgen von Schnappschüssen sind für den prototypischen Aufbau des Informationssystems grundsätzlich zwei Einschränkungen verbunden: Einerseits ist der genaue Zeitpunkt einer Veränderung nicht exakt zu benennen und andererseits bleiben Veränderungen, die nicht von Schnappschüssen erfasst sind, verborgen. Diesen Unschärfen könnte mit einer Erhöhung der Aktualisierungsfrequenz begegnet werden. Grundsätzlich ist das Informationsmodell sowie auch dessen Implementierung im Informationssystem in der Lage, selbst zeitlich sehr hoch auflösende Veränderungen detailliert und einzelobjektbezogen bzw. auch attributscharf abbilden zu können.

Die Integrationswerkzeuge sind als automatisierte Geoverarbeitungsketten in Form von FME-Workspaces umgesetzt. Innerhalb dieser Workspaces werden zunächst bereits im Informationssystem abgebildete Objekte aus den zu integrierenden Zeitscheiben extrahiert, mögliche Zustandsveränderungen detektiert und im Informationssystem dokumentiert. Daneben werden auch entstehende und untergehende Objekte erkannt und Übergangsbeziehungen zwischen diesen hergestellt, klassifiziert und kleinteilig im Informationssystem erfasst. Zudem beinhalten die Integrationswerkzeuge eine umfassende Validitäts- und Konsistenzprüfung der Eingangsdaten sowie auch Methoden zur Bereinigung der Geodaten von möglicherweise vorhandenen Artefakten. Hierzu sind insbesondere auch eigene Routinen zur Prüfung und Bereinigung entwickelt worden. Integrationsprozesse liegen für sämtliche im Modell abgebildeten Objektarten vor.

Damit lässt sich zusammenfassen: In diesem Kapitel kann die Umsetzbarkeit des LandModell^{TUM} in einem landesweiten, raumzeitlichen Informationssystem auf Grundlage flächendeckend verfügbarer Geodaten demonstriert werden. Wie sich anhand der Beispiele dieses Kapitels lediglich ansatzweise skizzieren lässt, erlaubt das im LandModell^{TUM} realisierte Konzept einer kleinteiligen Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Veränderung ein sehr hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich weiterführender Analysen. Die

gezeigten Beispiele verdeutlichen zudem, dass sich die gewählte Form der Abbildung für eine skalenübergreifende Betrachtung zeitlicher Veränderungen eignet. Dabei reicht die Bandbreite möglicher Betrachtungsweisen von einzelobjektbezogenen Analysen bis hin zu einem landesweiten Monitoring - jeweils auf Grundlage des selben Modells.

7 Werkzeug zur parametrischen Beschreibung der Parzellengeometrie

Geometrische Eigenschaften landwirtschaftlicher Parzellen stehen in engem Zusammenhang mit verschiedenen agrarökologischen, agrarökonomischen sowie sozialen Aspekten. Hinsichtlich agrarökonomischer Aspekte bilden Parzellengröße und -form wesentliche Einflussgrößen im Hinblick auf Arbeitszeitbedarf und damit auf die entstehenden Kosten je Flächeneinheit. Ursächlich für die mit zunehmender Parzellengröße steigenden Flächenleistung ist neben der Möglichkeit des effizienten Einsatzes leistungsfähigerer Landtechnik insbesondere die Degression anfallender Nebenzeiten, vor allem der Wendezeiten (stellvertretend: Dietzel et al. 2000). Werden jedoch gewisse Größen der Bewirtschaftungseinheiten überschritten, kann es aufgrund beschränkter Fassungsvermögen von Vorratsbehältern, Korntankvolumen oder Bunkern zu einer Zunahme unproduktiver Versorgungszeiten und Leerfahrten kommen (Dietzel et al. 2000; Herrmann 1995). Diese wiederum wirken sich unmittelbar negativ auf Kosten wie auch auf die Bodenbelastung aus (Liste 1992). Insbesondere bei kleinen Parzellen stellt die Form eine nicht unwesentliche Einflussgröße auf den Arbeitszeitbedarf sowie die mit der Bewirtschaftung verbundenen Kosten dar (Machl 2012; Oksanen 2007; Uppenkamp o. J.). Aus arbeitswissenschaftlicher bzw. ökonomischer Perspektive werden insbesondere einfache geometrische Formen wie langgestreckte Rechtecke oder Trapeze als Flächenform angestrebt (Mauersberger 1994; Schnurrbusch 1991), welche ein *Länge : Breite Verhältnis* (LBV) von 2:1 (Diemann 2001; J. Meißner 1996) bzw. in einem Bereich von 5:1 bis 2:1 aufweisen (Liste 1992). Als ungünstiger werden rechtwinklige Dreiecke und insbesondere komplexe Formen angesehen. Für eine umfassende Betrachtung der Schlaggestaltung auf verschiedene Aspekte der Bewirtschaftung sei auf Brunotte und Fröba (2007) verwiesen.

Aus agrarökologischer Perspektive beeinflusst die Parzellenform und -größe beispielsweise unmittelbar die Vorgewende- und Fahrspuranteile und damit den Anteil der potentiell durch die Befahrung mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen verdichtungsgefährdeten Anteile landwirtschaftlicher Parzellen (Duttmann et al. 2013). Außerdem beeinflusst die Form auch den potentiell von Mehrfachbearbeitung (z.B. Bodenbearbeitung, Ernte etc.) bzw. Überlappung (z.B. Pflanzenschutz, Düngung etc.) betroffenen Anteil landwirtschaftlicher Parzellen. Die Parzellenform bestimmt darüber hinaus neben dem Relief maßgeblich die erosive Hanglänge für Wassererosion bzw. die von Winderosion gefährdeten Bereiche landwirtschaftlicher Parzellen (Brunotte und Fröba 2007; Feldwisch et al. 2000).

Schließlich ist die Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen prägend für das Landschaftsbild und nicht unwesentlich bestimmend für die potentielle Vielfalt des Nutzungsmosaiks einer Landschaft. Die Randliniendichte als Maß für die Vielfalt aneinandergrenzender Lebensräume und -bedingungen eines Landschaftsausschnitts ergibt sich insbesondere aus der Geometrie der Landnutzungspartellen (Michel und Walz 2012; Röder et al. 2018). Die Größe und Form landwirtschaftlicher Parzellen steht damit gemeinsam mit vielen weiteren Faktoren in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Biodiversitätspotential einer Landschaft. So bieten gerade unregelmäßig geformte Parzellen durch einen zumeist höheren Anteil an

Feldrandstrukturen und Bereichen mit extensiverer Nutzung Lebensraum für verschiedenste Lebewesen innerhalb der Agrarlandschaft (stellvertretend: Siebrecht 2010).

Regional bestehen teils erhebliche Unterschiede der bestehenden Parzellenstrukturen in der Landwirtschaft. Als Maßzahl zur Bewertung dieser regionalen Unterschiede wird vielfach die Schlaggröße herangezogen (stellvertretend: Zenger und Friebe 2015). Diese Angabe ermöglicht jedoch nur eine bedingte Beschreibung regionaler Strukturunterschiede. Hilfreicher wären detaillierte und regional differenzierte Angaben zu Form und weiteren geometrischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Parzellen.

7.1 Verwandte Arbeiten

Die beiden nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick bereits bestehender Methoden zur Beschreibung geometrischer Parameter landwirtschaftlicher Parzellen und beleuchten genutzte Indikatoren zur Beschreibung der Form von Geometrieobjekten.

7.1.1 Beschreibung der Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen

Die Form landwirtschaftlicher Parzellen Gegenstand zahlreicher agrarökonomischer, agrarökologischer oder das Landschaftsbild betreffender Untersuchungen. In den Bereichen der Landschaftsarchitektur, der Ökologie oder auch der Flurneueordnung finden sich zahlreiche Arbeiten, die sich mit einer Analyse der Zusammensetzung, der Struktur oder der Fragmentierung von Landschaftsausschnitten auseinandersetzen (stellvertretend: Aslan et al. 2007; Demetriou et al. 2013b; Kirmikil und Arici 2013; Plexida et al. 2014; Walz 2015). Eine detaillierte und flächendeckende Beschreibung regionaler Unterschiede der Parzellenform sowie weiterer geometrischer Parameter aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive erfolgt bislang nur bedingt. Verbreitet dient ausschließlich die Größe landwirtschaftlicher Parzellen als Indikator zur Beschreibung regionaler Strukturunterschiede (stellvertretend: Zenger 2011; Zenger und Friebe 2015).

Demetriou et al. (2013a) oder Gonzalez et al. (2004) entwickeln jeweils Indikatoren, welche im Kontext der Flurneueordnung jeweils versuchen verschiedene Aspekte der Parzellengeometrie in einer zusammenfassenden Maßzahl auszudrücken. Oksanen (2007) führt im Zusammenhang mit der Optimierung von Fahrwegen im Feld eine Beschreibung der Parzellenform mit Hilfe verschiedener Formindikatoren sowie eine einfache Klassifikation anhand von Indikatorgrenzwerten durch. Machl (2012) und Machl et al. (2013) entwickeln einen indikatorenbasierten Ansatz zur Beschreibung, Klassifikation und Analyse regionaler Unterschiede der Parzellenform und weiterer Parameter landwirtschaftlicher Parzellen. Diese Arbeiten bilden auch die Grundlage der in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen.

7.1.2 Ausgewählte Indikatoren zur Beschreibung der Form von Geobjekten

Im Gegensatz zu geometrischen Eigenschaften wie Länge, Umfang oder Flächeninhalt ist die Form einer Geometrie nicht unmittelbar quantifizierbar (Lee und Sallee 1970). Insbesondere im Bereich der bildbasierten Analyse von Objekten bzw. des maschinellen Sehens aber auch in der Geoinformatik sind Indikatoren daher eine verbreitete Methode zur Beschreibung

der Form von Geobjekten (Aktas 2012; Kurnianggoro et al. 2018; Rosin 2003; Zakaria et al. 2012; Zhang und Lu 2004). Formmaßzahlen dienen dabei zumeist zur Beschreibung der Form im Allgemeinen, zur Extraktion geometrischer Objekte aus Bildern, zur Quantifizierung der Ähnlichkeit zwischen unterschiedlichen geometrischen Objekten sowie insbesondere auch zur semantischen Klassifikation von Objekten (Aktas 2012; Arkin et al. 1991; Basaraner und Cetinkaya 2017). Zu den Anwendungsfeldern zählen neben der Medizin (Ammar et al. 2017; Lobo et al. 2015; Rosin 2009) beispielsweise auch die Botanik (Chéné et al. 2016; Kalyoncu und Toygar 2015), die Siedlungsgeographie (Meinel et al. 2008; Schirmer und Axhausen 2016) oder aber auch die Landschaftsanalyse (Lang und Blaschke 2007; Renetzeder et al. 2010; Walz 2015). Ähnlich umfangreich wie die große Bandbreite der Anwendungsbereiche sind auch die Vielzahl und die unterschiedlichen Komplexitätsgrade der jeweils genutzten Methoden zur Beschreibung und Klassifikation der Form geometrischer Objekte (Basaraner und Cetinkaya 2017). Viele der in der Literatur beschriebenen Formdeskriptoren wie Momenteninvarianz-basierte Ansätze (Hu 1962; Teague 1980; Xu und Li 2008) oder aber Fourier-Deskriptoren (Burger und Burge 2013; Wang 2011; Zahn und Roskies 1972) sind in der Lage, Merkmalsvektoren mit hoher Dimensionalität bereitzustellen. Diese hochdimensionalen Merkmalsvektoren sind insbesondere für die Klassifikation geometrischer Objekte im Sinne einer Erkennung bzw. Interpretation von großer Relevanz. Allerdings unterliegen derartige Formdeskriptoren der Einschränkung, dass sie zumeist keine unmittelbar geometrisch interpretierbare Bedeutung besitzen (D. Žunić et al. 2012).

Gerade die geometrische Interpretierbarkeit von Formmaßzahlen ist für eine umfassende Analyse geometrischer Eigenschaften landwirtschaftlicher Parzellen aus agrarökologischer bzw. arbeitswissenschaftlicher Perspektive von Bedeutung (vgl. Abschnitt 7.1.1). Vor diesem Hintergrund beschränken sich die Ausführungen der folgenden Abschnitte auf die Betrachtung einfach interpretierbarer Formindikatoren mit unmittelbarer Relevanz für die Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen.

Grundsätzlich ist unter einem Formindikator ein aus der Geometrie eines Objekts abgeleiteter Zahlenwert zu verstehen, mit dessen Hilfe sich die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit zwischen Geometrieobjekten anhand morphologischer Eigenschaften quantifizieren lässt (Aktas 2012; Basaraner und Cetinkaya 2017). Um dieser Anforderung gerecht zu werden, müssen Formindikatoren eine Invarianz gegenüber Translation, Skalierung und Rotation aufweisen (Aktas 2012; Arkin et al. 1991; Wentz 1997). Gleichzeitig sollen Formindikatoren nach Möglichkeit einfach zu berechnen bzw. zu interpretieren sein und dabei über ein hohes Maß an Übereinstimmung mit der menschlichen Intuition verfügen (Arkin et al. 1991; Basaraner und Cetinkaya 2017; Wentz 1997; D. Žunić et al. 2012). Entsprechend sind gleiche Formen über identische Zahlenwerte, ähnliche Formen über ähnliche Zahlenwerte und unterschiedliche Formen über nicht identische Zahlenwerte zu repräsentieren (Lee und Sallee 1970; Wentz 1997).

7.1.2.1 Konvexität

Die Konvexität ist eine wesentliche Eigenschaft zur Beschreibung der Form eines geometrischen Objekts. Grundsätzlich gilt ein Polygon als konvex, wenn es keine Einkerbungen enthält. Dies ist dann der Fall, wenn alle Innenwinkel einen Wert kleiner 180° aufweisen. Enthält ein Polygon Einkerbungen - sind also Stützpunkte mit einem Innenwinkel größer 180° enthalten - gilt ein Polygon als konkav. Alternativ könnte die Konvexität auch dadurch überprüft werden, dass sich bei einem konvexen Geometrieobjekt jegliche Verbindung zweier Polygonstützpunkte vollständig innerhalb des Polygons befinden. Für viele Fragestellun-

gen relevanter als eine reine Unterscheidung zwischen konvexen und konkaven Polygonen ist die Quantifizierung des Grades der Konvexität. In der Literatur finden sich dazu - in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellungen - unterschiedliche Herangehensweisen:

Martin und Rosin (2004) beispielsweise führen neben anderen Maßzahlen zur Quantifizierung der Konvexität einen Indikator an, welcher die Anzahl konkaver Stützpunkte ins Verhältnis zur Gesamtanzahl aller Stützpunkte eines Polygons setzt. Der Grad der Überschreitung eines Innenwinkels von 180° lässt sich dabei zusätzlich als Gewichtungsfaktor mit berücksichtigen.

In der Literatur deutlich verbreiteter sind Konvexitätsindikatoren, welche die Abweichung der Geometrie eines Polygons von der Geometrie des jeweiligen konvexen Hüllpolygons beschreiben. Auch hier finden sich unterschiedliche Herangehensweisen zur Quantifizierung der Konvexität.

So lässt sich die Abweichung eines Polygons P zu dessen konvexen Hüllpolygon, wie in Indikator 7.1 gezeigt, zum einen über das Verhältnis der Flächeninhalte eines Polygons P ($\text{Fläche}(P)$) und dem Flächeninhalt des konvexen Hüllpolygons ($\text{Fläche}(\text{KH}(P))$) beschreiben (Basaraner und Cetinkaya 2017; Kalyoncu und Toygar 2015; Kurnianggoro et al. 2018; Rosin und J. Žunić 2008; Saad et al. 2011; Yang et al. 2008; J. Žunić und Rosin 2004).

$$\text{Konvexität}_{\text{Fläche}}(P) = \frac{\text{Fläche}(P)}{\text{Fläche}(\text{KH}(P))} \quad (7.1)$$

Alternativ lässt sich die Abweichung zwischen der Geometrie eines Polygons P und der Geometrie des jeweiligen konvexen Hüllpolygons wie in Indikator 7.2 dargestellt über das Verhältnis der Perimeter quantifizieren (Jiao et al. 2012; Peura und Iivarinen 1997; Rosin und J. Žunić 2008; J. Žunić und Rosin 2004).

$$\text{Konvexität}_{\text{Perimeter}}(P) = \frac{\text{Perimeter}(\text{KH}(P))}{\text{Perimeter}(P)} \quad (7.2)$$

Sowohl $\text{Konvexität}_{\text{Fläche}}(P)$ als auch $\text{Konvexität}_{\text{Perimeter}}(P)$ liefern Werte in einem Bereich von 0,0 bis 1,0 zurück, wobei ein Wert von 1,0 eine vollständige und ein Wert nahe 0,0 eine geringe Konvexität (= hohe Konkavität) eines Polygons anzeigt. Aufgrund der Abhängigkeit von der Geometrie der konvexen Hülle eines Polygons zeigen sich beide Indikatoren empfindlich gegenüber schmalen Fortsätzen entlang des Polygonumrings (Rosin und J. Žunić 2008).

Schmale Einkerbungen hingegen, welche zu einer geringen flächenhaften Abweichung zwischen der Geometrie eines Geoobjekts und dessen konvexer Hülle führen jedoch in Abhängigkeit der durchzuführenden Analysen von Relevanz sind, werden von $\text{Konvexität}_{\text{Perimeter}}(P)$ deutlicher angezeigt als dies bei $\text{Konvexität}_{\text{Fläche}}(P)$ der Fall ist.

7.1.2.2 Rechteckigkeit

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Rechteckigkeit geometrischer Objekte (Rosin 1999, 2000; D. Žunić et al. 2012). Ein häufig genutzter Ansatz

zur Quantifizierung der Rechteckigkeit erfolgt in der Literatur verbreitet über den Quotienten aus der Fläche eines Polygons $Fläche(P)$ und dem Flächeninhalt des flächenkleinsten umgebenden Rechtecks eines Polygons P $Fläche(KUR(P))$ (Indikator 7.6; Basaraner und Cetinkaya 2017; da Fontoura Costa und Marcondes Cesar 2001; Kurnianggoro et al. 2018; Rosin 2008; Yang et al. 2008; D. Žunić et al. 2012).

$$\text{Rechteckigkeit}(P) = \frac{\text{Fläche}(P)}{\text{Fläche}(KUR(P))} \quad (7.3)$$

Der Indikator zeigt sich empfindlich gegenüber schmalen Fortsätzen, da diese die Größe des flächenkleinsten umgebenden Rechtecks enorm beeinflussen können (Basaraner und Cetinkaya 2017; Rosin 1999). Aufgrund dieser Sensitivität schlägt Rosin (1999) einen alternativen Indikator zur Beschreibung der Diskrepanz zwischen der Geometrie eines Polygons und der Geometrie eines sog. robusten Rechtecks vor. Die Anpassung eines robusten Rechtecks erfolgt unter Minimierung der Abweichung zwischen der Polygoneometrie und der Geometrie eines Rechtecks. Das angepasste, robuste Rechteck muss dabei nicht mehr alle Stützpunkte des Polygons enthalten.

Auch Basaraner und Cetinkaya (2017) schlagen einen Indikator auf Grundlage eines an die Geometrie eines Polygons angepassten, flächengleichen und entsprechend skalierten Rechtecks vor.

7.1.2.3 Kompaktheit und Kreisförmigkeit

Indikatoren zur Quantifizierung der Kompaktheit bzw. Kreisförmigkeit von geometrischen Objekten sind in der Literatur häufig anzutreffen. Zur Beschreibung dieser Eigenschaft finden sich daher zahlreiche Maßzahlen (stellvertretend: Basaraner und Cetinkaya 2017; Kurnianggoro et al. 2018; MacEachren 1985; Montero und Bribiesca 2009).

Neben Indikatoren wie der radialen Distanz (Kurnianggoro et al. 2018) oder dem sog. Roughness Index (Basaraner und Cetinkaya 2017) sind in der Literatur insbesondere Indikatoren verbreitet, welche die Fläche eines geometrischen Objekts in Verhältnis zu dessen Perimeter setzen. So kann beispielsweise der Quotient aus quadriertem Perimeter und der Fläche eines Geometrieobjekts (Montero und Bribiesca 2009) bzw. dessen Kehrwert (Kurnianggoro et al. 2018; Yang et al. 2008) als Maßzahl zur Beschreibung der Kompaktheit eines Polygons herangezogen werden (Indikator 7.4).

$$\text{Kompaktheit}(P) = \frac{\text{Perimeter}^2(P)}{\text{Fläche}(P)} \quad (7.4)$$

Die Kreisförmigkeit eines Polygons lässt sich alternativ auch wie in Indikator 7.5 dargestellt als Quotient der Fläche eines Polygons und der Fläche eines Kreises gleichen Umfangs ausdrücken (stellvertretend: Basaraner und Cetinkaya 2017). Der Indikator wird in der Literatur als *Isoperimetrischer Quotient* (IQ) bezeichnet.

$$\text{IQ}(P) = \frac{\text{Fläche}(P)}{\text{Fläche}(\text{IPK}(P))} = \frac{4 * \pi * \text{Fläche}(P)}{\text{Perimeter}^2(P)} \quad (7.5)$$

7.1.2.4 Dreieckigkeit

Ähnlich dem Vorgehen zur Quantifizierung der Rechteckigkeit lässt sich die Dreieckigkeit von Polygonen über den Quotienten der Flächeninhalte eines zu beschreibenden Polygons und des kleinsten umgebenden Dreiecks quantifizieren (Rosin 2003). O'Rourke et al. (1986) beschreibt dazu einen Algorithmus zur Ableitung des kleinsten umgebenden Dreiecks für geometrische Objekte. In Abhängigkeit der Geometrie eines Geoobjekts können dabei jedoch unerwartete Ergebnisse auftreten. In Rosin (2003) findet sich zudem ein weiterer Ansatz zur Quantifizierung der Dreieckigkeit, welcher in der Arbeit als „polygonal triangle approximation“ bezeichnet wird. Bei dieser Herangehensweise werden über eine dynamische Programmierung geometrische Dreiecksmodelle an die Eingangsdaten angepasst und die dabei auftretenden Abweichungen minimiert. Der Grad der Dreieckigkeit lässt sich dann über den Fehler zwischen angepasstem Dreieck und der Geometrie des Polygons ausdrücken. Dieser Ansatz zur Quantifizierung der Dreieckigkeit besitzt die grundlegende Einschränkung, dass die Berechnung des kleinsten umgebenden Dreiecks mit großem Rechenaufwand verbunden ist, weshalb der Ansatz nur bedingt für eine landesweite Quantifizierung und Klassifikation der Parzellenform einsetzbar sind.

Als weiterer Herangehensweise zur Quantifizierung der Dreieckigkeit finden sich in der Literatur auch sog. momentenbasierte Ansätze (Rosin 2000, 2003), wie sie auch in Oksanen (2007) zur Quantifizierung der Dreieckigkeit eingesetzt werden. Insbesondere die letztgenannten Ansätze weisen eine weniger intuitive Interpretierbarkeit der Indikatorwerte auf.

7.2 Forschungsfragen

Im Zusammenhang mit der Beschreibung regionaler Unterschiede der Parzellenstrukturen und -formen sind sowohl Forschungsfragen aus dem Bereich der Agrarwissenschaften bzw. der Flurneuordnung wie auch aus dem Bereich der Geoinformatik zu beantworten. Als fachliche Fragestellungen aus den Agrarwissenschaften bzw. der Flurneuordnung seien angeführt:

1. Wie lassen sich bestehende, regionale Unterschiede der Parzellenstruktur quantitativ beschreiben?
2. Wie lässt sich die Form landwirtschaftlicher Parzellen klassifizieren und durch geeignete geometrische Parameter charakterisieren?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen sind aus der Perspektive der Geoinformatik Methoden und Konzepte zu entwickeln, die eine performante und flächendeckende Beschreibung der Parzellengeometrie ermöglichen. Entsprechend sind Antworten auf folgende methodischen Fragen zu finden:

1. Wie lässt sich die Form von Polygonen quantifizieren und kategorisieren?
2. Wie ist das Informationsmodell des LandModell^{TUM} zu erweitern, um Angaben zur Form sowie zu den dafür charakteristischen Parametern abbilden zu können?

7.3 Konzeptuelle Überlegungen

Eine umfassende Beschreibung arbeitswirtschaftlich relevanter Parameter der Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen erfordert zunächst eine Klassifikation der Form und anschließend eine Ableitung aussagekräftiger Kennzahlen zur Beschreibung derselben. Im Gegensatz zu geometrischen Eigenschaften wie der Fläche oder dem Umfang ist die Form von Parzellen nicht unmittelbar aus der Geometrie des betreffenden Objekts abzuleiten. In der Literatur dienen verbreitet Indikatoren zur quantitativen Beschreibung der Form von Geoobjekten.

Aus arbeitswissenschaftlicher und auch agrarökologischer Perspektive sind die Parzellenformen insbesondere hinsichtlich ihrer Komplexität sowie hinsichtlich der Rechteckigkeit und der Dreieckigkeit zu beschreiben (vgl. u.a. Brunotte und Fröba 2007; Engelhardt 2004; Oksanen 2007). Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die konzeptuellen Überlegungen zur Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen. Diese bilden die Grundlage für eine darauf aufbauende Klassifikation der Form sowie für die Charakterisierung der Form anhand geeigneter geometrischer Parameter. Die in dieser Arbeit genutzte Herangehensweise setzt insbesondere auf die in Machl (2012) entwickelten und in Machl et al. (2013) erweiterten Methoden und Konzepte auf.

7.3.1 Genutzte Methoden zur Beschreibung der Parzellengeometrie

Die zur Beschreibung der Parzellenform eingesetzten Indikatoren adressieren die Komplexität, die Rechteckigkeit, die Kreisförmigkeit sowie auch die Dreieckigkeit von Polygonen. Bei der Auswahl der Indikatoren liegt ein großes Augenmerk auf einer nach Möglichkeit einfachen Interpretierbarkeit der jeweiligen Maßzahlen. Die folgenden Abschnitte beleuchten kurz die genutzten Indikatoren.

7.3.1.1 Quantifizierung der Konvexität

Zur Quantifizierung der Konvexität der Parzellen dient neben dem Quotienten aus der Fläche des jeweiligen Polygons und der Fläche des konvexen Hüllpolygons (Indikator 7.1) auch der Quotient aus dem Umfang des konvexen Hüllpolygons und dem Perimeter des äußeren Polygonumrings einer Parzelle (Indikator 7.2). Beide Indikatoren können Werte in einem Bereich von 0,0 bis 1,0 annehmen, wobei ein Wert von 1,0 ein vollständig konvexes und Werte nahe 0,0 auf eine stark konkave Form hinweisen. Aufgrund ihrer jeweiligen Definition reagieren die beiden Indikatoren, wie bereits dargestellt, unterschiedlich empfindlich auf Einkerbungen im Polygon. So werden flächenhaft kleine, unter Umständen deutlich die Bewirtschaftung oder agrarökologische Aspekte betreffende Abweichungen zwischen einem Polygon und dessen konvexer Hülle bei der Konvexität hinsichtlich der Fläche weniger sichtbar, als dies bei der Konvexität nach dem Perimeter der Fall ist. Abbildung 49 verdeutlicht dies anhand zweier Beispiele. Im linken Beispiel zeigen die beiden Konvexitäts-Indikatoren sowohl hinsichtlich der Fläche als auch hinsichtlich des Umfangs eine deutliche Abweichung der Polygoneometrie von der Geometrie der konvexen Hülle an. Hingegen weisen im rechten Beispiel die zahlreichen Einkerbungen des Polygons insgesamt einen eher geringen Flächeninhalt auf, weshalb es einen relativ hohen Grad der Konvexität hinsichtlich der Flä-

che aufweist. In diesem Fall zeigt die Konvexität hinsichtlich des Perimeters die vorhandenen Einkerbungen deutlicher an.

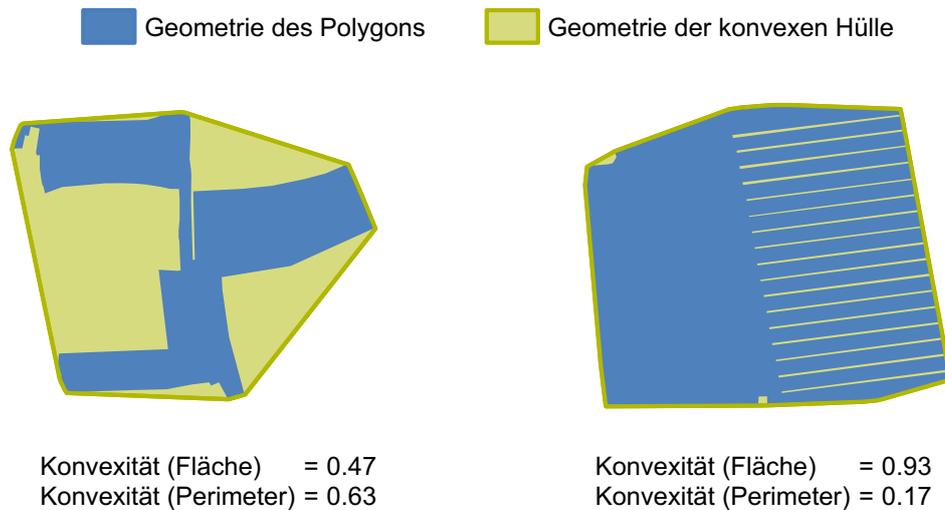


Abbildung 49: Quantifizierung der Konvexität von Polygonen hinsichtlich der Fläche und hinsichtlich des Perimeters

7.3.1.2 Quantifizierung der Rechteckigkeit

Zur Quantifizierung der Rechteckigkeit von Parzellenpolygonen dienen in dieser Arbeit zwei Herangehensweisen: einerseits wird die Rechteckigkeit des Polygons selbst und andererseits auch die Rechteckigkeit der konvexen Hülle eines Polygons betrachtet. Beide Ansätze zur Quantifizierung der Rechteckigkeit stützen sich grundlegend auf eine Gegenüberstellung der Geometrie eines Polygons und der Geometrie des flächenkleinsten umgebenden Rechtecks (Abbildung 50). Damit erfolgt die Beschreibung der Rechteckigkeit in Anlehnung an Indikator 7.6.

Der Grad der Rechteckigkeit eines Polygons lässt sich dabei über den Quotienten aus der Fläche des Polygons ($\text{Fläche}(P)$) und der Fläche des kleinsten umgebenden Rechtecks ($\text{Fläche}(\text{KUR}(P))$) ausdrücken als:

$$\text{Rechteckigkeit}(P) = \frac{\text{Fläche}(P)}{\text{Fläche}(\text{KUR}(P))} \quad (7.6)$$

Basierend auf diesem Ansatz lässt sich auch die Rechteckigkeit des konvexen Hüllpolygons als Quotient aus der Fläche des konvexen Hüllpolygons ($\text{Fläche}(\text{KH}(P))$) und der Fläche des kleinsten umgebenden Rechtecks ($\text{Fläche}(\text{KUR}(P))$) quantifizieren als:

$$\text{Rechteckigkeit}(\text{KH}(P)) = \frac{\text{Fläche}(\text{KH}(P))}{\text{Fläche}(\text{KUR}(P))} \quad (7.7)$$

Im Gegensatz zur Rechteckigkeit des Polygons ermöglicht dieser Ansatz eine Differenzierung von Abweichungsursachen zwischen einem Polygon und dem jeweils kleinsten umgebenden Rechteck (vgl. Machl 2012; Machl et al. 2013). So blendet der Vergleich der

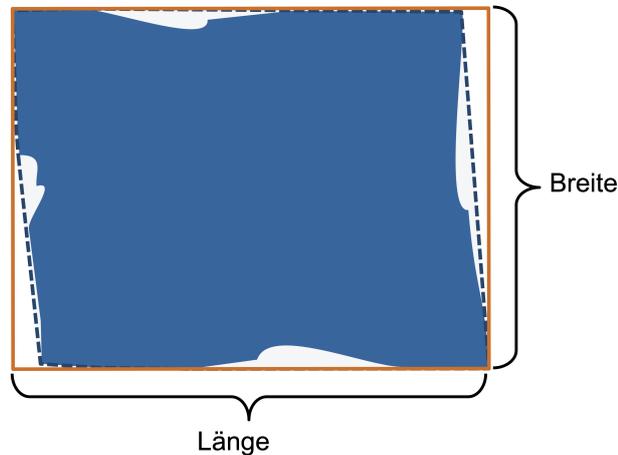


Abbildung 50: Geometrie, konvexe Hülle und flächenkleinstes umgebendes Rechteck eines beispielhaften Polygons

konvexen Hülle eines Polygons mit dessen flächenkleinsten umgebenden Rechteck die von konkaven Einkerbungen verursachte Abweichung aus. Dadurch lassen sich Rechteckigkeit und Konvexität unabhängiger voneinander betrachten und interpretieren. Aufgrund dieser zusätzlichen Information ergeben sich insbesondere im Hinblick auf die Klassifikation der Polygonformen deutliche Vorteile.

7.3.1.3 Quantifizierung der Dreieckigkeit

Für die Klassifikation von dreieckigen Polygonen wird für die Parzellen jeweils das flächengrößte im konvexen Hüllpolygon enthaltene Dreieck konstruiert und anschließend die Fläche dieses Dreiecks der Fläche des konvexen Hüllpolygons gegenübergestellt. Die Konstruktion des flächengrößten inliegenden Dreiecks für das konvexe Hüllpolygon lässt sich durch eine Berechnung des Flächeninhalts für sämtliche Kombinationen möglicher Stützpunkte und eine anschließende Selektion des flächengrößten Dreiecks realisieren.

Der Grad der Dreieckigkeit des konvexen Hüllpolygons lässt sich anschließend ausdrücken als:

$$\text{Dreieckigkeit}(\text{KH}(\text{P})) = \frac{\text{GED}(\text{KH}(\text{P}))}{\text{Fläche}(\text{KH}(\text{P}))} \quad (7.8)$$

Der Indikator kann Werte in einem Intervall von 0,0 bis 1,0 annehmen, wobei ein Wert von 1,0 lediglich für ein Dreieck erreicht werden kann. Analog zum Indikator Rechteckigkeit des konvexen Hüllpolygons (7.7) ermöglicht dieser Indikator in Kombination mit Angaben zur Konvexität des Polygons im Hinblick auf die Klassifikation der Form eine Differenzierung von Abweichungsursachen (konkave Einkerbungen bzw. sonstige Formabweichungen).

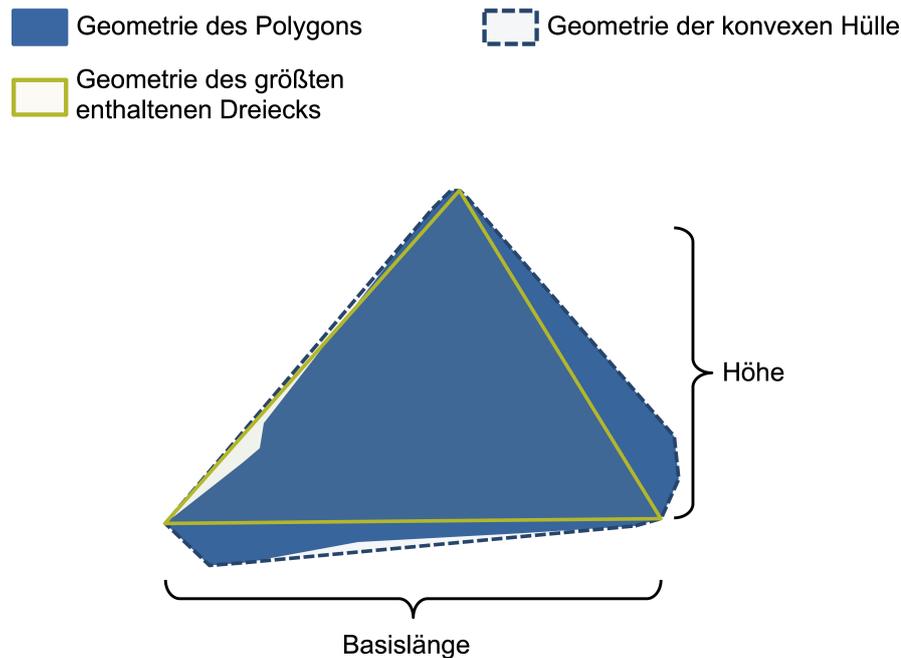


Abbildung 51: Geometrie, konvexe Hülle und flächengrößtes innenliegendes Dreieck eines beispielhaften Polygons

7.3.1.4 Quantifizierung der Kreisförmigkeit

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgt die Quantifizierung der Kreisförmigkeit von Parzellenpolygonen über den Indikator Isoperimetrischer Quotient (IQ; Indikator 7.5). Der Indikator entspricht dem Quotienten der Fläche eines Polygons und der Fläche eines perimetergleichen Kreises.

7.3.2 Klassifikation und parametrische Beschreibung der Parzellenform

Voraussetzung für eine landesweite Beschreibung geometrischer Parameter der Feldstücksgeometrie ist zunächst eine Klassifikation der Form von Parzellen. In Anlehnung an Machl (2012) und Machl et al. (2013) erfolgt die Klassifikation der Parzellenform in einem mehrstufigen Selektions- und Entscheidungsprozess. Dieser ist in Abbildung 52 schematisch dargestellt. Die Kategorisierung der Parzellenform basiert dabei auf einem mehrstufigen indikatorbasierten Siebverfahren, mit dessen Hilfe sich die Parzellen anhand von Indikatorschwellwerten in Formklassen einteilen lassen. Neben der Darstellung des Klassifikationsablaufs zeigt die Abbildung auch bereits die zur Klassifikation genutzten Schwellwerte für einzelne Indikatoren. Diese Schwellwerte sind das Ergebnis einer manuellen bzw. visuellen Kalibrierung durch den Autor.

Für die Klassifikation der Parzellenformen werden zunächst anhand von Indikatorgrenzwerten für die Konvexität hinsichtlich des Perimeters sowie hinsichtlich der Fläche von Parzellenpolygonen *stark konkave Parzellen* als solche klassifiziert. In einer nächsten Stufe können über einen Schwellwert für den Isoperimetrischen Quotienten *kreisförmige Parzellen* extrahiert werden.

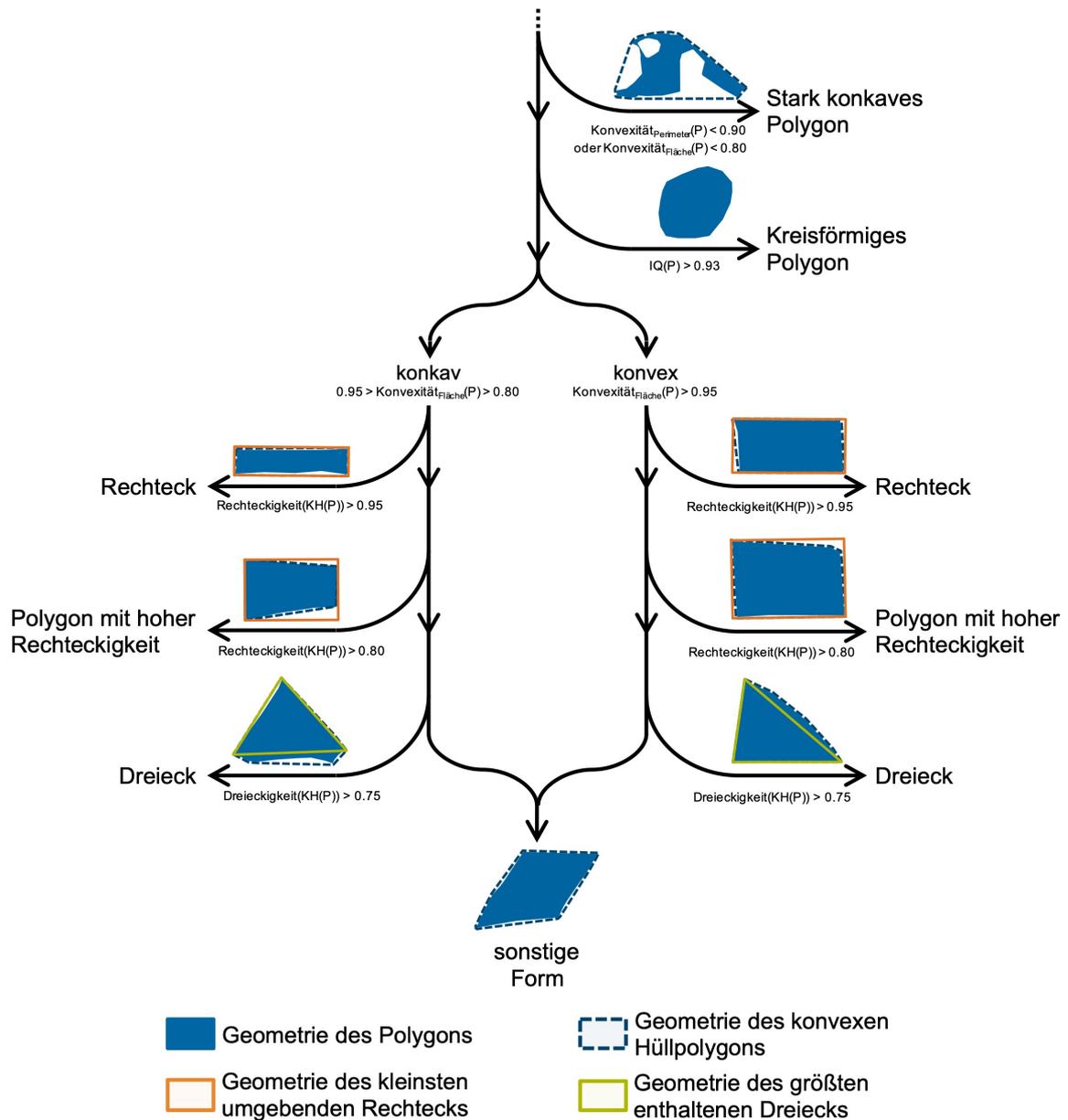


Abbildung 52: Entscheidungsbaum für die Klassifikation der Parzellenformen einschließlich der gesetzten Grenzwerte; P bezeichnet darin ein Polygon, KH meint konvexe Hülle eines Polygons

Während die Selektion von stark konkaven und kreisförmigen Polygonen unmittelbar auf der Geometrie von Parzellenpolygonen aufsetzt, basieren die weiteren Klassifikationsschritte auf einem zweistufigen Verfahren, welches zunächst die Konvexität betrachtet und die weitere Klassifikation auf Grundlage des jeweils konvexen Hüllpolygons durchführt. Ein grundlegender Vorzug dieses Ansatzes liegt in der Möglichkeit zur detaillierten Differenzierung zwischen den auf Einkerbungen bzw. auf sonstige Ursachen zurückzuführenden Abweichungen zwischen der Form einer Parzellen und den damit abzugleichenden Referenzformen. Anhand der Konvexität hinsichtlich der Fläche wird im Ablauf zwischen konvexen und konkaven Formen unterschieden bevor im weiteren Verlauf auf Basis des konvexen Hüllpolygons eine Klassifikation der Form stattfindet. In einer ersten Stufe lassen sich anhand von Grenzwerten für die Rechteckigkeit *konkave* bzw. *konvexe Rechtecke* sowie *konkave* bzw. *konvexe Polygone hoher Rechteckigkeit* klassifizieren. Über Schwellwerte für die Dreieckig-

keit lassen sich im Folgenden *konvexe* bzw. *konkave Dreiecke* kategorisieren. Polygone, die sich nicht anhand der gesetzten Grenzwerte einer Kategorie zuordnen lassen, werden als *sonstige Form* klassifiziert.

Die Klassifikation der Parzellenform ermöglicht eine weitergehende Beschreibung über die für die jeweilige Form charakteristischen Parameter. Diese sind im Fall von Kreisen die Lage des Mittelpunkts und des Radius, im Fall von konvexen und konkaven Rechtecken bzw. Polygonen mit hoher Rechteckigkeit Angaben zur Länge und Breite des umgebenden Rechtecks (siehe Abbildung 50) sowie im Falle von Dreiecken Informationen zur Basislänge und Höhe des Dreiecks (siehe Abbildung 51).

7.3.3 Erforderliche Erweiterung des semantischen Datenmodells

Zur Abbildung der Analyseergebnisse bzw. zur semantischen Anreicherung von Objekten ist am Informationsmodell eine Erweiterung um zusätzliche Klassen und Attribute vorzunehmen. Abbildung 53 zeigt das Klassendiagramm der im Paket *AgriculturalParcelShapeDescription* abgebildeten Inhalte.

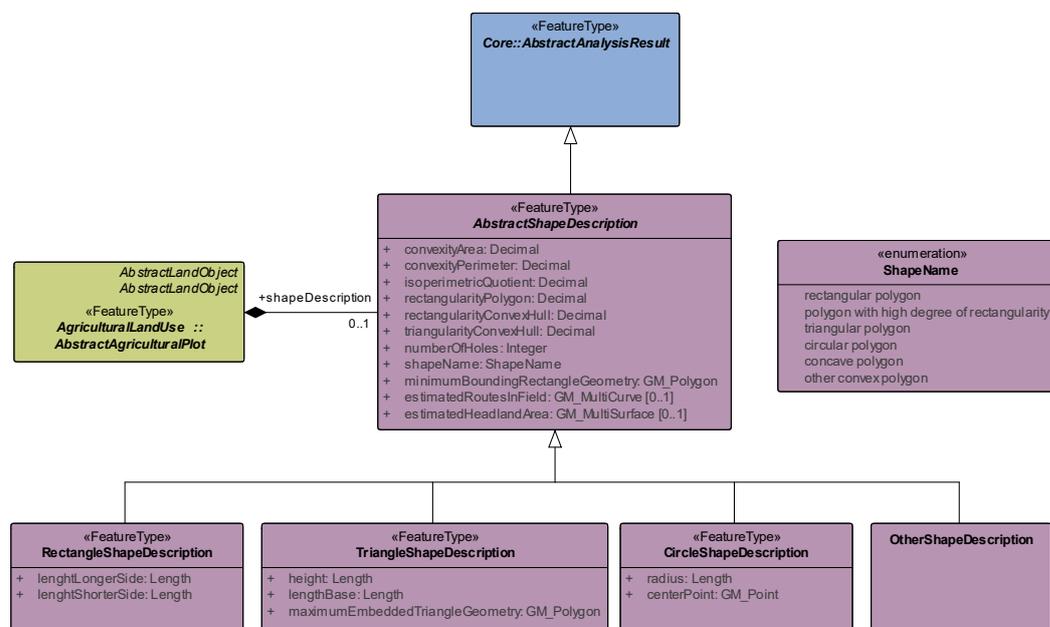


Abbildung 53: UML-Klassendiagramm des LandModell^{TUM}-Pakets *AgriculturalParcelShapeDescription*

Die Klasse *AbstractShapeDescription* stellt eine Spezialisierung der im Core-Paket abgebildeten abstrakten Klasse *AbstractAnalysisResult* dar und steht in Beziehung mit der abstrakten Klasse *AbstractAgriculturalPlot* des Pakets *AgriculturalLandUse*. Als Attribute enthält die Klasse *AbstractShapeDescription* grundlegende Angaben zur Form von Parzellen. Diese beziehen sich auf Feldstücke bzw. Geometriezustände von Feldstücken zu bestimmten Zeitpunkten und verfügen daher über keine eigene Versionierung. Zu den Attributen zählen neben Formindikatoren zur Beschreibung der Konvexität (Attribute *convexityArea* und *convexityPerimeter*), der Rechteckigkeit (Attribute *rectangularityPolygon* und *rectangularityConvexHull*), der Dreieckigkeit der konvexen Hülle (Attribut *triangularityConvexHull*), der Kreisförmigkeit bzw. Kompaktheit (Attribut *isoperimetricQuotient*) auch Angaben zur Anzahl der im Polygon enthaltenen Löcher (Attribut *numberOfHoles*) sowie zur Bezeichnung der

klassifizierten Polygonform (Attribut *shapeName*). Darüber hinaus enthält die Klasse auch die Geometrie des kleinsten umgebenden Rechtecks (Attribut *minimumBoundingRectangleGeometry*). Optional sind auch geschätzte Fahrspuren im Feld (Attribut *estimatedRoutesInField*) sowie Vorgewendebereiche (Attribut *estimatedHeadlandArea*) in der Klasse abgebildet. Als Spezialisierungen der Klasse *ShapeDescription* ermöglichen die Klassen *RectangleShapeDescription*, *TriangleShapeDescription* und *CircleShapeDescription* eine Abbildung formtypischer Geometrieparameter für rechteckige bzw. rechtecksähnliche, dreieckige und kreisförmige Polygone.

7.4 Implementierung des Analysewerkzeugs

Das Werkzeug zur Beschreibung, Klassifikation und Charakterisierung der Parzellenform ist als FME-Workspace implementiert. Innerhalb dieses Workspaces werden zunächst für die Geoobjekte die einzelnen Formindikatoren berechnet, die Formen anhand des in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Ansatzes klassifiziert und charakteristische Formparameter abgeleitet. Die im Verlauf der Analysen gewonnenen Informationen zu Formindikatoren, Formklassen sowie relevanten geometrischen Parametern der jeweiligen Formklassen fließen als Verweise auf die jeweiligen Objektidentifikatoren zurück in das Informationssystem, wo sie für weiterführende Analysen zur Verfügung stehen.

Die Grenzwerte für die einzelnen Indikatoren sind als nutzerdefinierbare Parameter angelegt. Damit lassen sich in Abhängigkeit der untersuchten Fragestellung die jeweiligen Grenzwerte anpassen.

7.5 Ergebnisse

Sämtliche der gewonnenen Angaben werden als Eigenschaft der betreffenden Objekte betrachtet und dienen daher zur semantischen Anreicherung der Objekte. Entsprechen liegen die Indikatorwerte zur Flächenformbeschreibung, die Angaben zur Klassifikation der Form sowie auch die für die jeweilige Formklasse spezifischen Geometrieigenschaften auf Einzelobjektebene vor, wodurch die Angaben für weiterführende Analysen zur Verfügung stehen. Die Angaben lassen sich beispielsweise aggregiert auf Basis räumlicher Einheiten darstellen, um räumliche Muster genauer zu untersuchen.

In den folgenden Abschnitten soll ein Eindruck möglicher Betrachtungsweisen von Parzellenformen und deren regionaler Verteilung vermittelt werden, die auf Grundlage des semantisch angereicherten LandModell^{TUM} möglich sind. Die Abschnitte erheben daher auch keinen Anspruch auf eine umfassende Darstellung sämtlicher Ergebnisse.

7.5.1 Betrachtungen zur Feldstücksgröße

Abbildung 54 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion der Feldstücksgrößen in Bayern. Demnach weist ein Viertel der Parzellen eine Fläche kleiner 0,5 ha (q_{25}) auf. Entsprechend sind 75 % der Feldstücke größer diesem Wert. Die Hälfte der Feldstücke ist kleiner bzw. größer 1,1 ha (q_{50}). Ein Anteil von 25 % der bewirtschafteten Flächen ist größer als 2,2 ha (q_{75}).

Damit bewegt sich die Hälfte der Feldstücke in einem Größenbereich von größer 0,5 ha (q_{25}) und kleiner 2,2 ha (q_{75}).

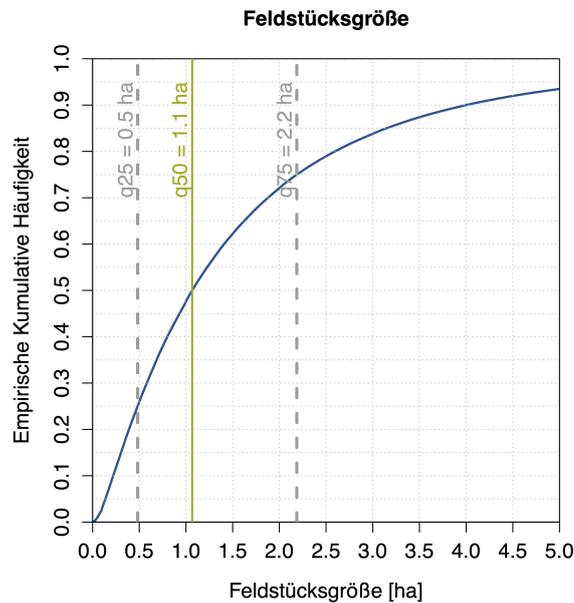


Abbildung 54: Verteilungsfunktion der Feldstücksgrößen in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)

Hinsichtlich der Feldstücksgröße ergeben sich deutliche regionale Unterschiede. Abbildung 55 zeigt die regionale Verteilung des 50 %-Quantil von Feldstücksgrößen in Bayern aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster. Weitere Darstellungen zu regionalen Quantilen der Feldstücksgröße finden sich im Abschnitt C.1 des Anhangs.

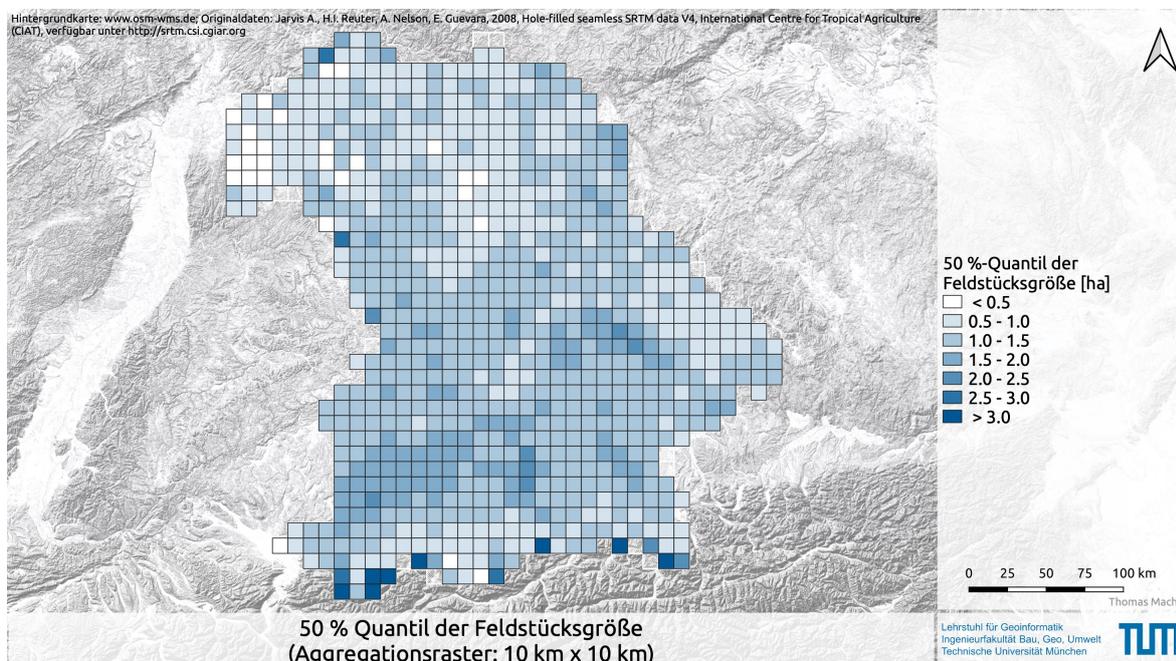


Abbildung 55: 50 %-Quantil der Feldstücksgröße für das Jahr 2018 aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

Auch im Bezug auf die Flächennutzung zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Acker- und Grünlandflächen. In Abbildung 56 sind die Summenhäufigkeiten der Feldstücksgrößen

sowie auch die zugehörigen Quartile dargestellt. Demnach weisen Grünlandparzellen insgesamt eine geringere Parzellengröße auf als dies bei Ackerflächen der Fall ist. So besitzen 75 % der Ackerflächen eine Größe von mehr als 0,7 ha (q_{25}), 50 % der Parzellen eine Größe von mehr als 1,4 ha (q_{50}) und 25 % der Feldstücke eine Fläche von mehr als 2,7 ha (q_{75}). Bei Grünlandparzellen weisen 75 % der Parzellen eine Fläche von mehr als 0,3 ha (q_{25}), 50 % der Feldstücke eine Fläche größer als 0,7 ha (q_{50}) und 25 % größer als 1,5 ha (q_{75}) auf. Damit liegen die jeweiligen Quartile für Grünland in etwa bei der Hälfte des Werts von Ackerflächen.

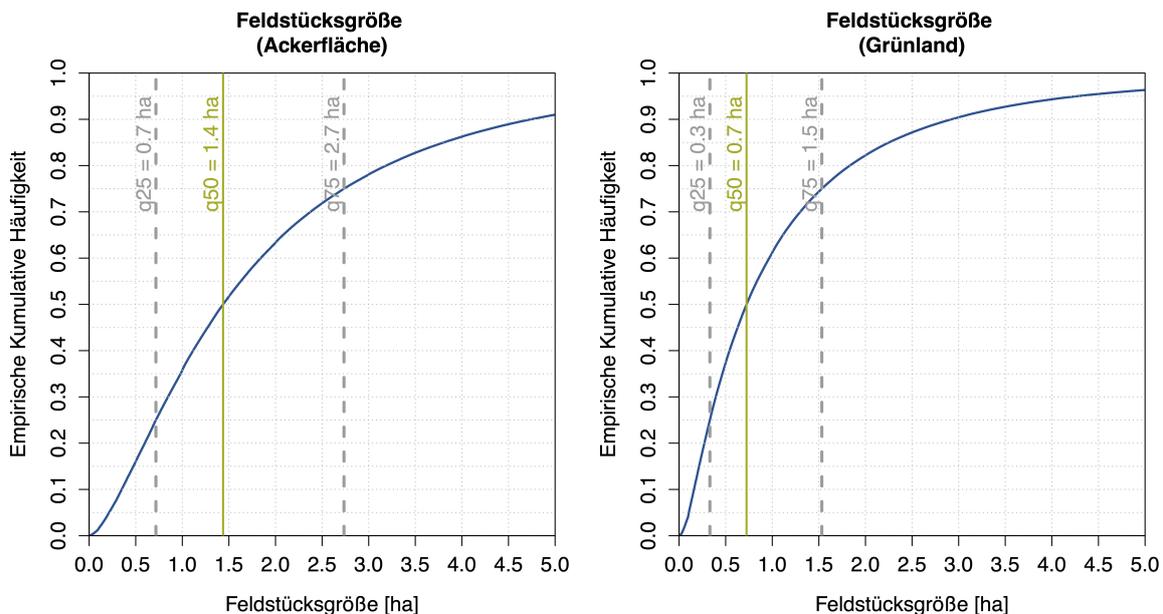


Abbildung 56: Summenhäufigkeitsfunktion der Feldstücksgröße in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandnutzung (Stichtag 01.06.2018)

7.5.2 Indikatorbasierte Beschreibung regionaler Parzellenstrukturen

Die folgenden drei Abschnitte beleuchten die Aspekte Konvexität, Rechteckigkeit und Kompaktheit von Feldstückspolygonen. In den einzelnen Abschnitten erfolgt zunächst eine landesweite Darstellung der beobachteten Werte für die jeweiligen Indikatoren bevor im weiteren Verlauf auf regionale Muster eingegangen wird.

7.5.2.1 Konvexität

Die Konvexität von Parzellenpolygonen kommt in dieser Arbeit sowohl über den Quotienten aus der Fläche eines Polygons und der Fläche des konvexen Hüllpolygons (Indikator 7.1) sowie auch über den Quotienten aus dem Perimeter des konvexen Hüllpolygons und dem Perimeter des Polygons (Indikator 7.2) zum Ausdruck. Beide Indikatoren bewegen sich in einem Wertebereich von 0,0 bis 1,0, wobei ein Wert von 1,0 lediglich für vollständig konvexe Polygone erreicht werden kann. Die Abbildungen 57 und 58 zeigen die beiden Indikatorwerte für einen zufällig ausgewählten Bereich. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist reagiert die Konvexität hinsichtlich der Fläche weniger empfindlich auf flächenmäßig eher kleine, jedoch hinsichtlich der Form durchaus relevante Einkerbungen.

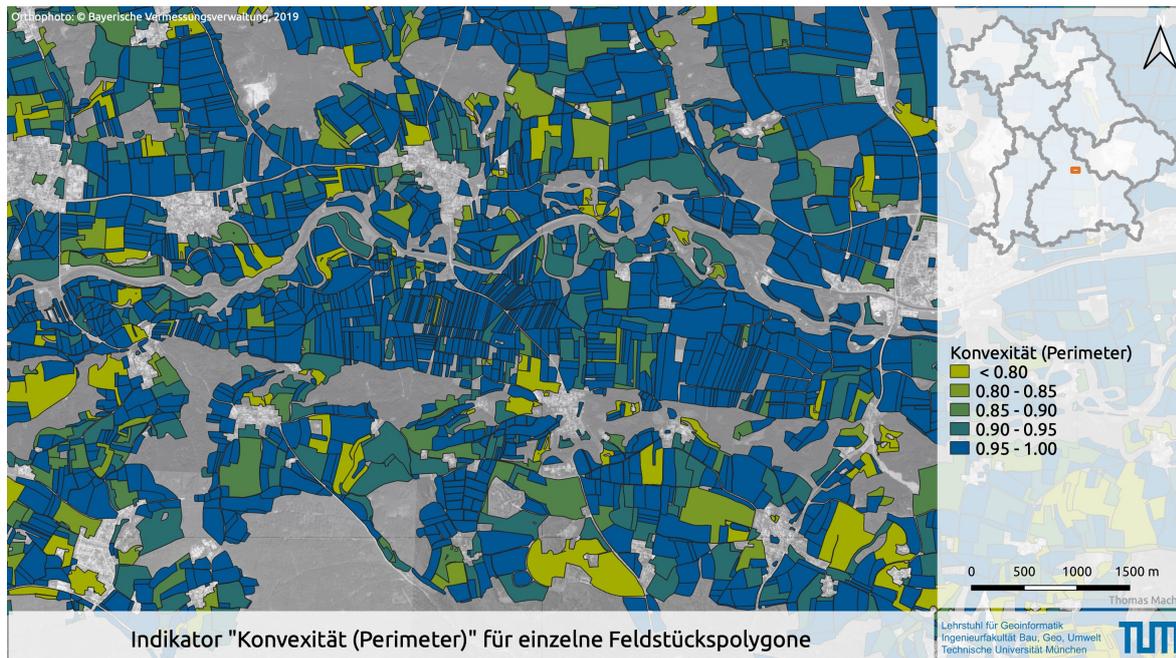


Abbildung 57: Indikatorwert Konvexität (Perimeter) für beispielhaft ausgewählte Parzellen

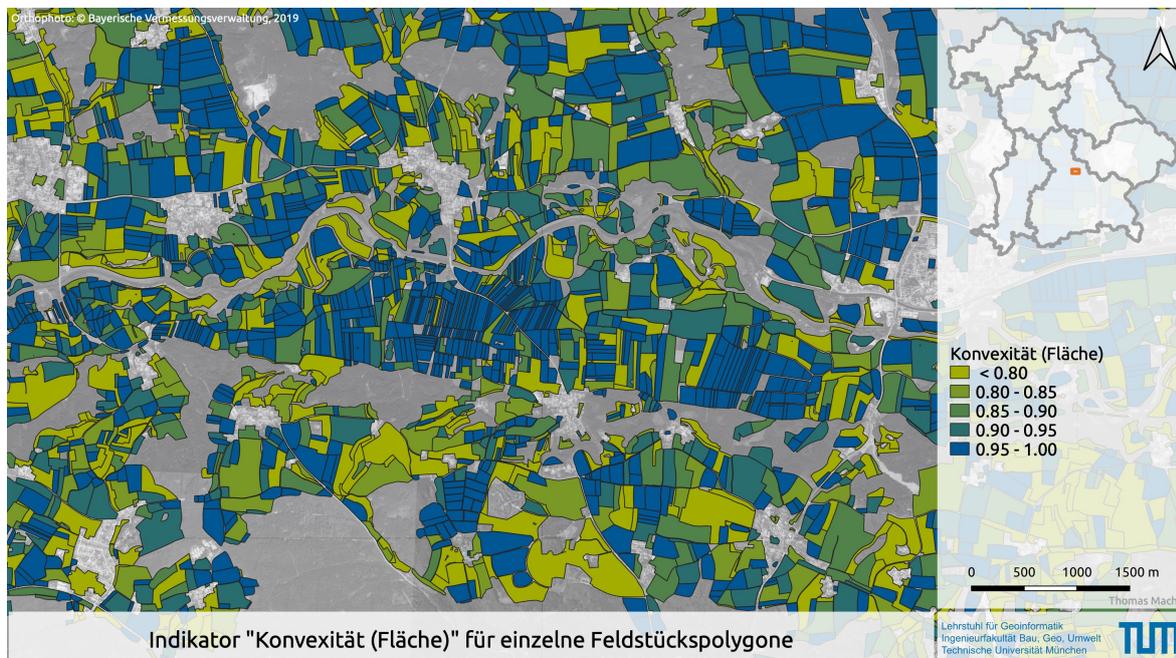


Abbildung 58: Indikatorwert Konvexität (Fläche) für beispielhaft ausgewählte Parzellen

Abbildung 59 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktionen der Indikatoren Rechteckigkeit bezüglich der Fläche (links) und bezüglich des Perimeters (rechts) für sämtliche Feldstücke in Bayern. Demnach weisen 75 % der Feldstücke in Bayern hinsichtlich der Fläche eine Konvexität von mehr als 0,86 (q_{25}) und 50 % der Parzellen eine Konvexität größer 0,96 (q_{50}) auf. Hinsichtlich der Konvexität bezogen auf den Perimeter zeigt sich für 75 % der Parzellen ein Wert von mehr als 0,96 (q_{25}) bzw. für 50 % der Feldstücke ein Wert von nahezu 1,00 (q_{50}).

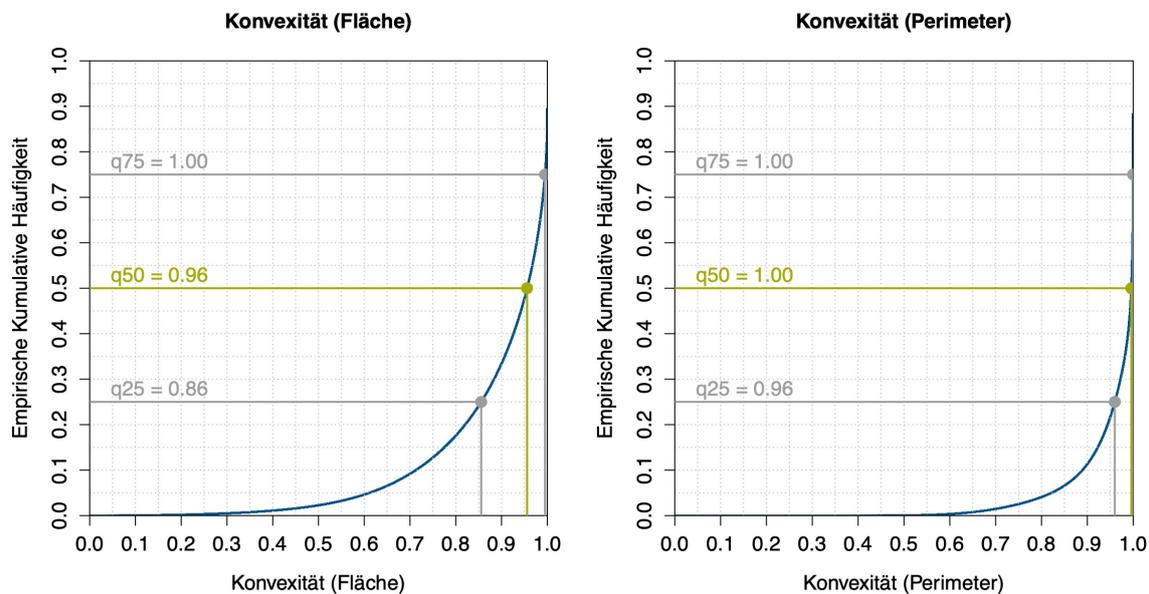


Abbildung 59: Summenhäufigkeitsfunktion der Indikatoren Konvexität bezüglich der Fläche (links) und bezüglich des Perimeters (rechts) für die Feldstücke in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)

Bei der landesweiten Betrachtung der Konvexität von Feldstückspolygonen zeigen sich regionale Unterschiede der bestehenden Parzellenstrukturen. Die Abbildung 60 veranschaulicht diese regionalen Unterschiede anhand des q_{50} für den Indikator Konvexität bezüglich der Fläche. Eine höhere Konvexität der Feldstücke zeigt sich insbesondere in den Gäulagen Niederbayerns sowie in weiten Teilen Unter- und Mittelfrankens sowie in den nördlichen Teilen Schwabens und Oberbayerns. Zusätzliche Darstellungen zur regionalen Verteilung von Quartilen der Konvexität finden sich im Abschnitt C.2.1 des Anhangs.

Auch zwischen Acker- und Grünlandflächen lassen sich Unterschiede hinsichtlich der beobachteten Konvexität feststellen. So weisen 75 % der Feldstücke mit Ackernutzung eine Konvexität hinsichtlich der Fläche von mehr als 0,92 (q_{25}). Für Grünlandflächen liegt dieser Wert bei 0,77 (q_{25}). Ähnlich verhält es sich mit dem q_{50} : Für Ackerparzellen liegt dieser Wert bei 0,98 und für Grünlandparzellen bei 0,91.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei Betrachtung der Konvexität von Feldstücken bezogen auf den Perimeter. Abbildung 62 zeigt die nach Acker- und Grünlandnutzung differenzierte Häufigkeitsverteilung der Indikatorwerte für die Konvexität nach dem Perimeter. Für 75 % der Parzellen zeigt sich bei Ackerflächen ein Indikatorwert größer 0,99 bzw. bei Grünlandparzellen ein Wert größer 0,92. Die 50 %-Quantile liegen die Werte bei nahezu 1,0 (Ackerfläche) bzw. 0,98 (Grünlandfläche).

Beide Indikatoren deuten damit für Ackerparzellen auf einen gegenüber Grünlandparzellen höheren Grad an Konvexität und damit implizit auf eine geringere Komplexität hin.

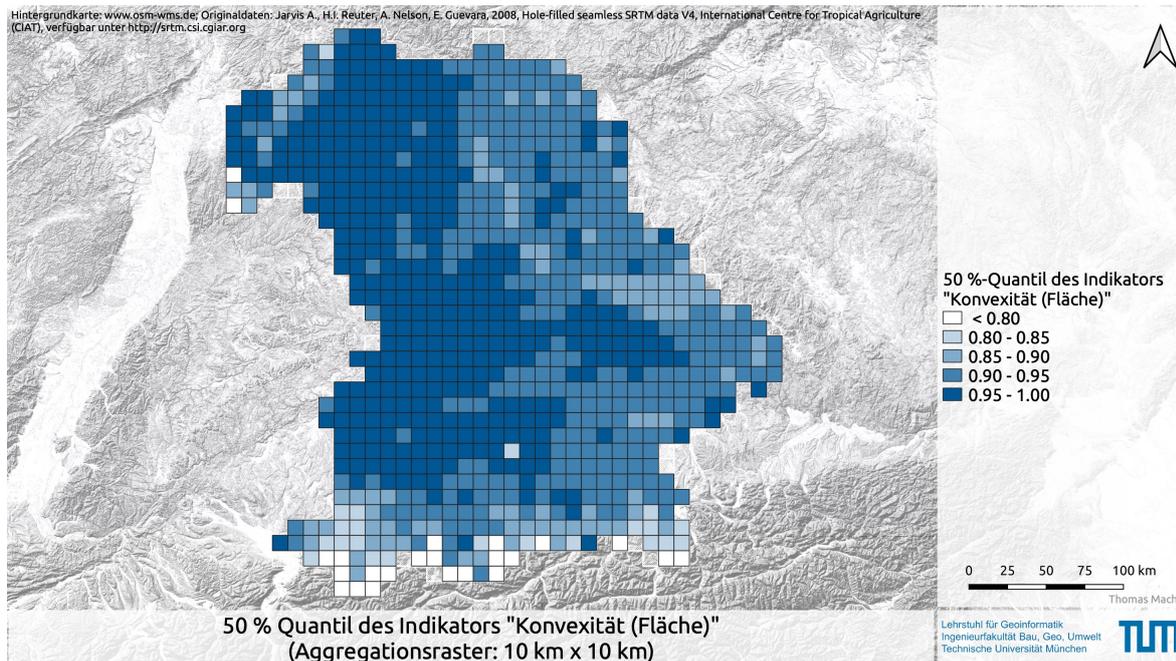


Abbildung 60: 50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke im Jahr 2018 aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

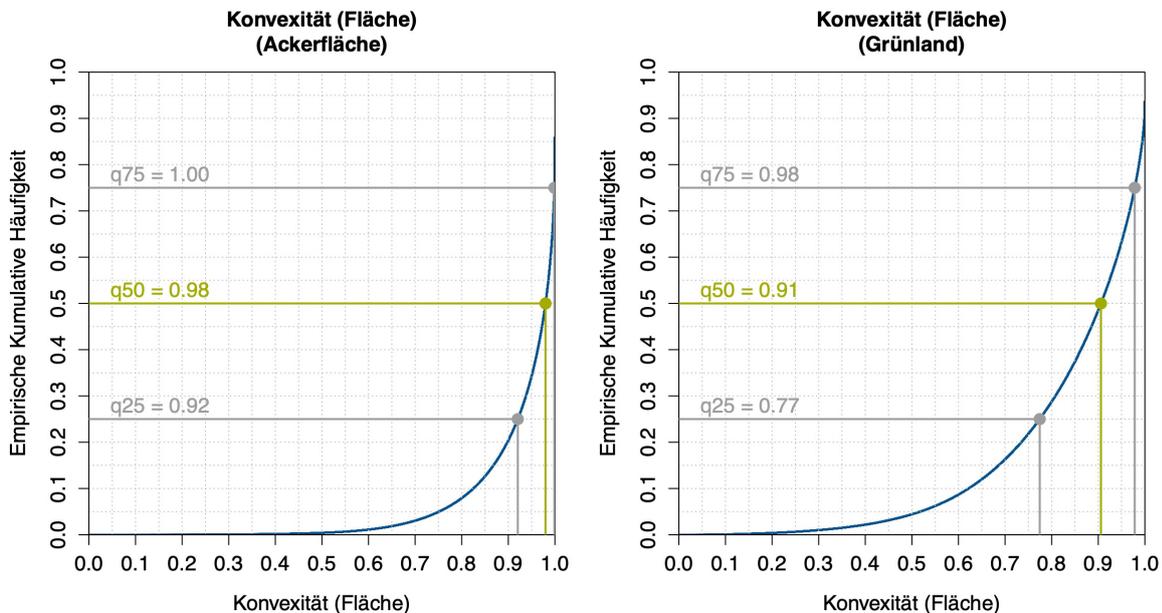


Abbildung 61: Summenhäufigkeitsfunktion für den Indikator Konvexität (Fläche) differenziert nach Flächennutzung (Stichtag: 01.06.2018)

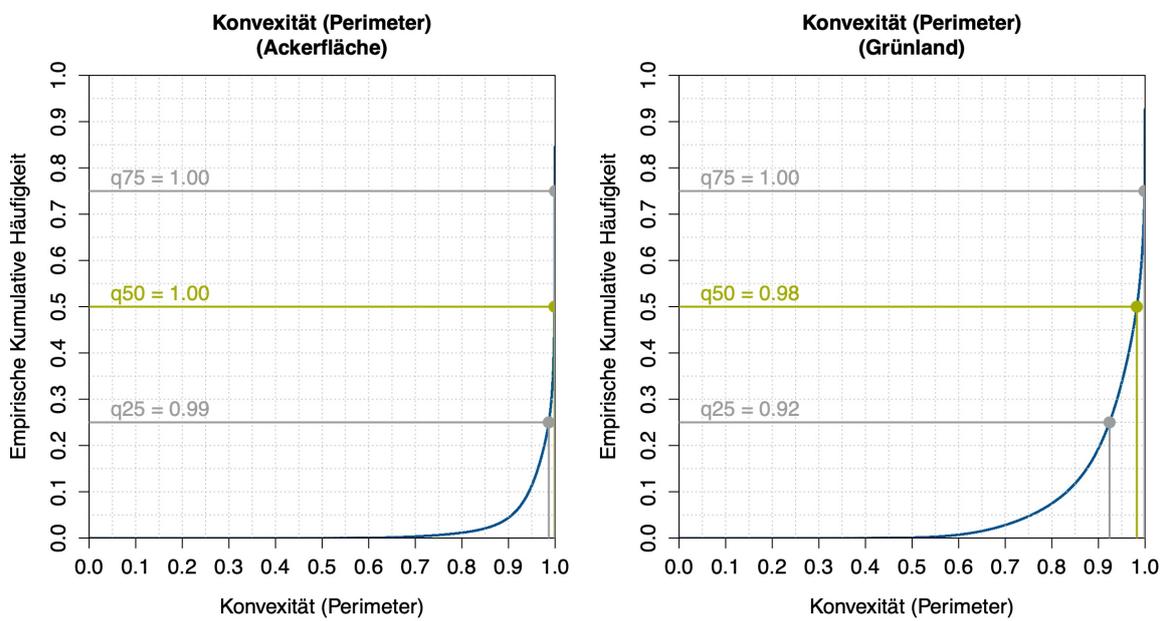


Abbildung 62: Summenhäufigkeitsfunktion für den Indikator Konvexität (Perimeter) differenziert nach Flächennutzung (Stichtag: 01.06.2018)

7.5.2.2 Rechteckigkeit

Die Quantifizierung der Rechteckigkeit erfolgt in dieser Arbeit einerseits über den Quotienten aus der Fläche eines Polygons und der Fläche des kleinsten umgebenden Rechtecks sowie andererseits über das Verhältnis aus der Fläche der konvexen Hülle eines Polygons und der Fläche des kleinsten umgebenden Rechtecks. Da die Rechteckigkeit der konvexen Hülle eines Polygons lediglich in Kombination mit Angaben zu Konvexität interpretierbare Aussagen liefert und daher insbesondere für die Klassifikation der Parzellenformen relevant ist, beschränkt sich die Beschreibung der Rechteckigkeit in diesem Abschnitt lediglich auf die Rechteckigkeit des Polygon selbst. Abbildung 63 vermittelt einen Eindruck des Zusammenhangs zwischen der Form eines Polygons und den jeweils zugehörigen Indikatorwerten für das Verhältnis aus Flächeninhalt eines Polygons zur Fläche des kleinsten umgebenden Rechtecks.



Abbildung 63: Indikatorwert Rechteckigkeit für beispielhaft ausgewählte Parzellen

Bei Betrachtung sämtlicher Feldstücke in Bayern zeigt sich für die Rechteckigkeit die in Abbildung 64 dargestellte Summenhäufigkeitsfunktion. Demnach weisen 75 % aller Feldstücke in Bayern eine Rechteckigkeit von mehr als 0,62 und 50 % der Feldstücke eine Rechteckigkeit größer einem Wert von 0,76 auf.

Bezüglich der räumlichen Verteilung zeigen sich sichtbare regionale Muster, wie aus Abbildung 65 hervorgeht. So besitzt in weiten Teilen Unterfrankens, Mittelfrankens, dem nördlichen Teil Schwabens und Oberbayerns sowie in den niederbayerischen Gäulagen die Hälfte der Parzellen eine Rechteckigkeit von mehr als 0,80.

Unterschiede des Grades der Rechteckigkeit von Feldstücken zeigen sich insbesondere auch zwischen Acker- und Grünlandflächen. Demnach besitzen 75 % der Feldstücke mit Ackernutzung eine Rechteckigkeit von mehr als 0,70 (q_{25}) und 50 % der Parzellen eine Rechteckigkeit von mindestens 0,82 (q_{50}). Für Grünland weisen 75 % der Parzellen eine Rechteckigkeit von mehr als 0,55 (q_{25}) auf. Gleichzeitig ist für 75 % der Parzellen die Rechteckigkeit kleiner einem Wert von 0,80 (q_{75}). Damit weisen Feldstücke mit Ackernutzung insgesamt betrachtet eine höhere Rechteckigkeit auf. Einen gewissen Einfluss dürfte da-

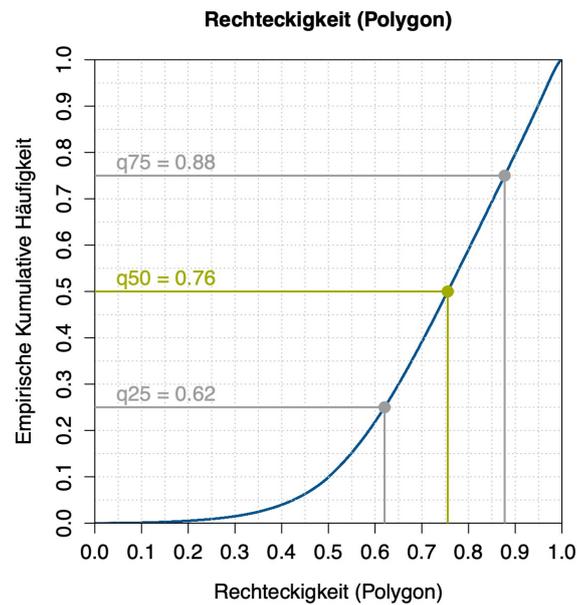


Abbildung 64: Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators Rechteckigkeit für Feldstückspolygone (Stichtag 01.06.2018)

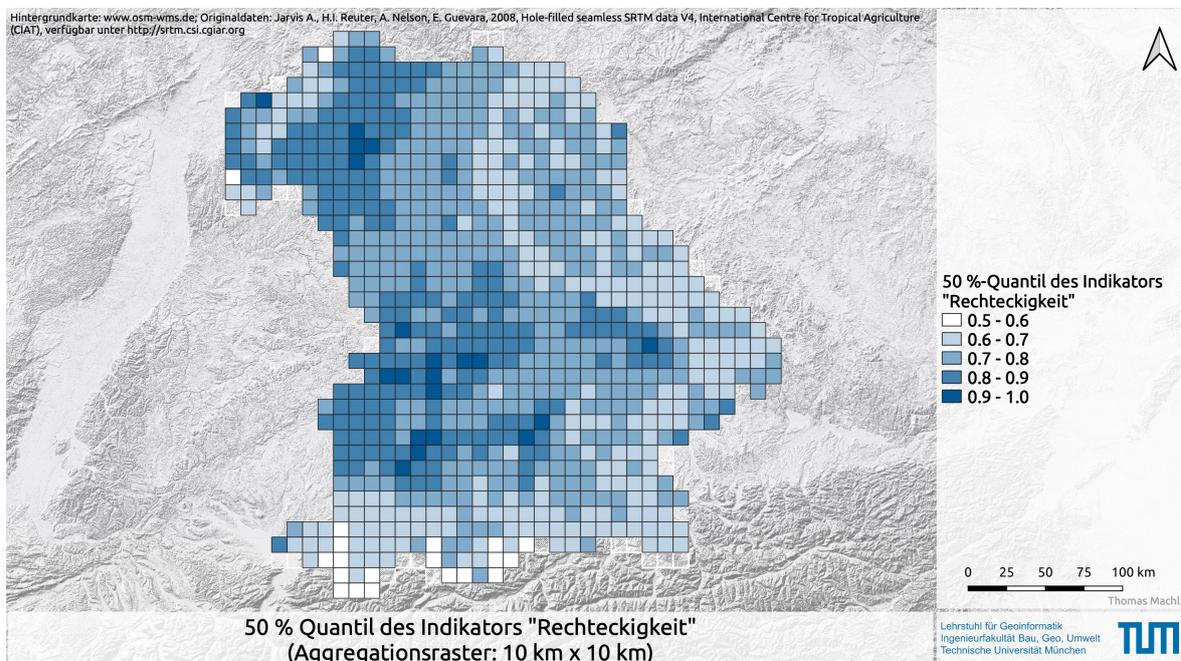


Abbildung 65: 50 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

bei auch insbesondere die höhere Konkavität von Grünlandflächen gegenüber Parzellen mit Ackernutzung besitzen (Abschnitt 7.5.2.1).

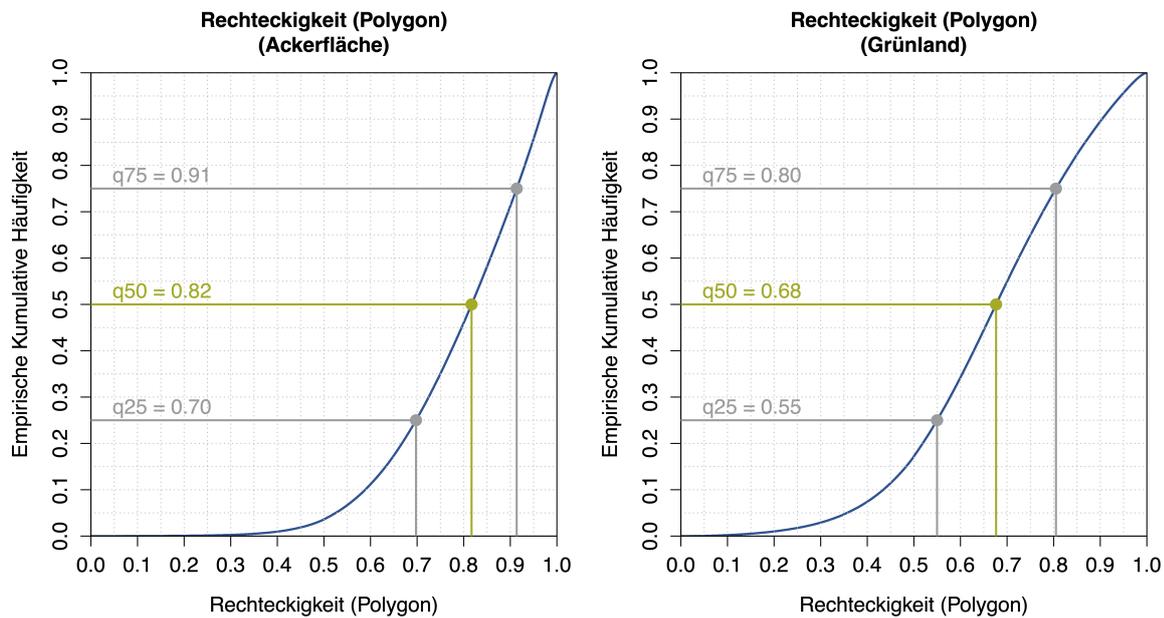


Abbildung 66: Empirische Kumulative Häufigkeit der Rechteckigkeit von Feldstückspolygonen differenziert nach Acker und Grünlandnutzung (Stichtag: 01.06.2018)

7.5.2.3 Kreisförmigkeit

Der Grad der Kreisförmigkeit wird in dieser Arbeit über das Verhältnis der Fläche eines Polygons und der Fläche eines perimetergleichen Kreises über den Indikator *Isoperimetrischer Quotient* (IQ) (Indikator 7.5) zum Ausdruck gebracht. Abbildung 67 gibt einen Eindruck des Zusammenhangs zwischen der Form von Polygonen und den jeweiligen Indikatorwerten.

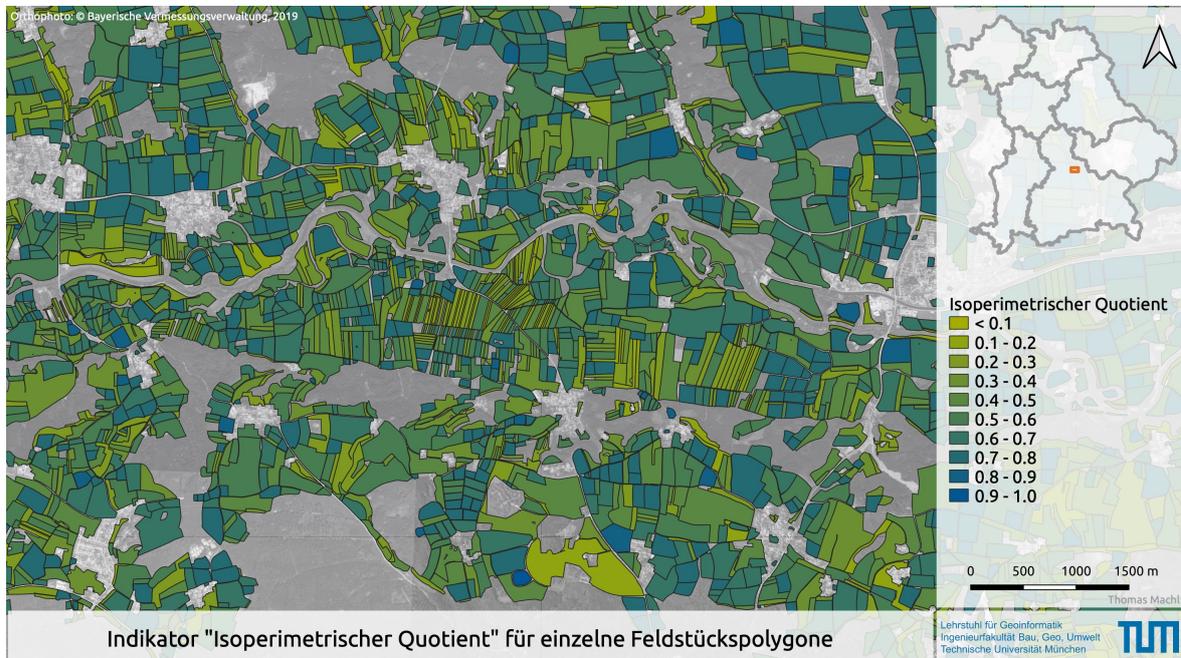


Abbildung 67: Indikatorwert IQ für beispielhaft ausgewählte Parzellen

Abbildung 68 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion des Indikators für die Feldstücke in Bayern. Zwischen Acker- und Grünlandflächen ergeben sich Unterschiede, wie aus Abbildung 69 hervorgeht. Demnach weisen Ackerflächen gegenüber Grünlandflächen tendenziell höhere Indikatorwerte auf. Einen gewissen Einfluss dürfte dabei auch insbesondere die höhere Konkavität von Grünlandflächen gegenüber Parzellen mit Ackernutzung besitzen (Abschnitt 7.5.2.1)

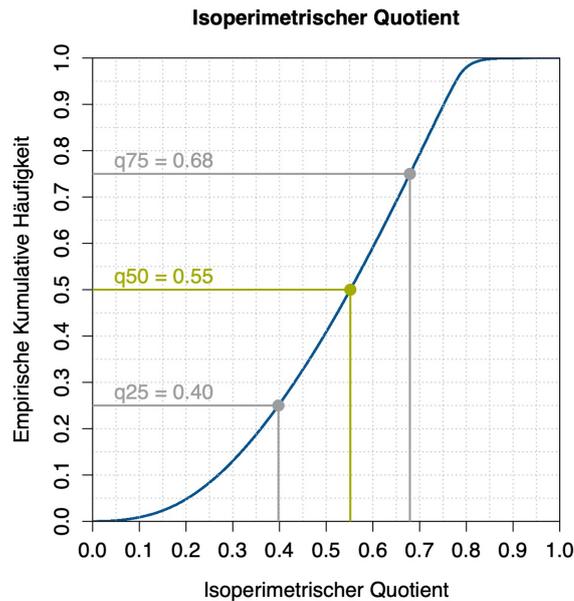


Abbildung 68: Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators IQ (Stichtag: 01.06.2018)

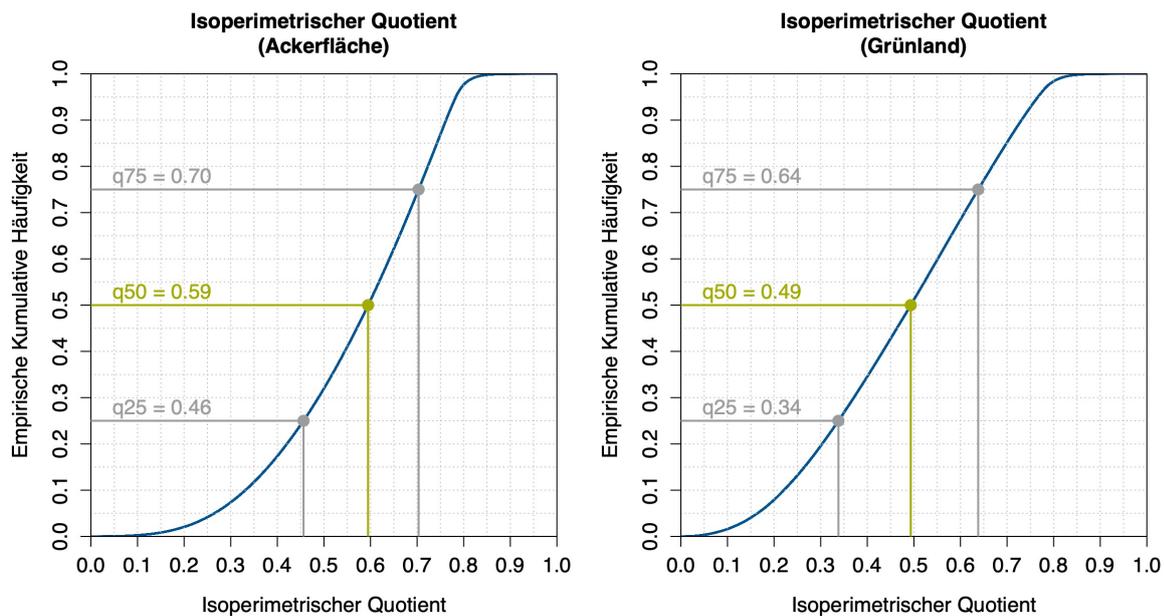


Abbildung 69: Empirische Kumulative Häufigkeitsfunktion des Indikators IQ differenziert nach Acker und Grünlandflächen (Stichtag: 01.06.2018)

7.5.3 Klassifikation der Form landwirtschaftlicher Parzellen

Das Ergebnis der durchgeführten Klassifikation gemäß dem in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Vorgehen ist für einen beispielhaft ausgewählten Ausschnitt in Abbildung 70 dargestellt. Der Klassifikation liegen die bereits in Abbildung 52 gezeigten Indikatorgrenzwerte zugrunde.

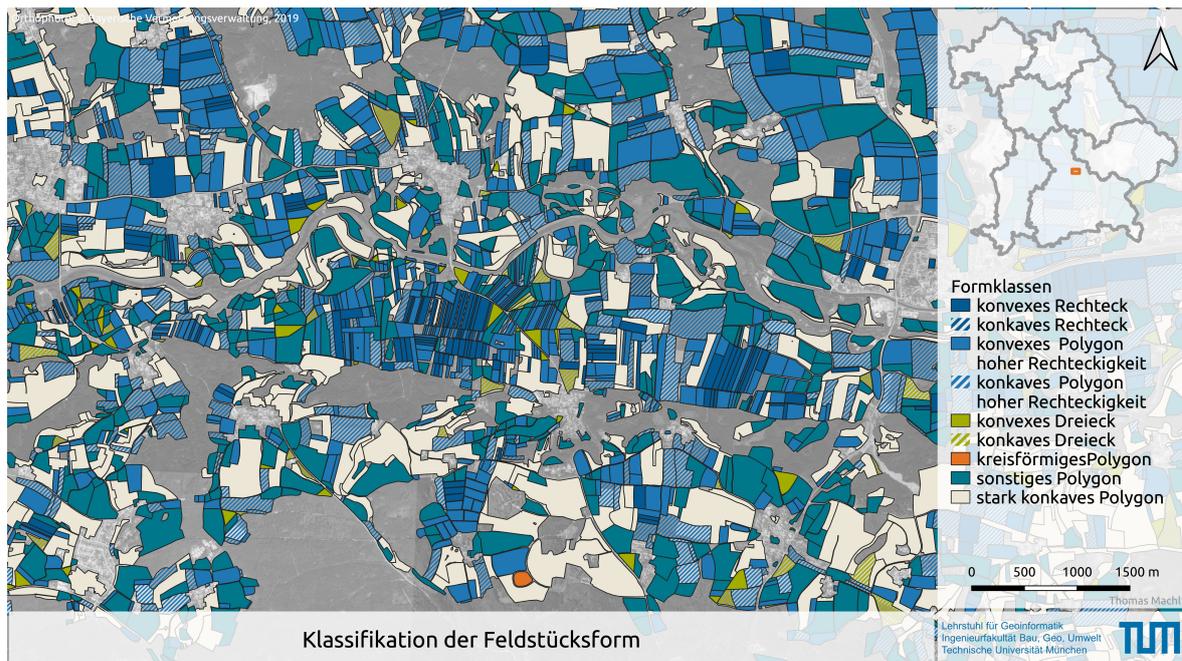


Abbildung 70: Ergebnis der Formklassifikation für beispielhaft ausgewählte Parzellen

Landesweit lassen sich insgesamt 55 % der Feldstücke den Kategorien *Rechteck*, *Polygon hoher Rechteckigkeit*, *Dreieck* oder *Kreis* zuordnen. Entsprechend gelten 45 % der Parzellen den Klassen *sonstige Form* bzw. *stark konkaves Polygon* an. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Anteile einzelner Formklassen findet sich in Abbildung 71. Für Bayern lassen sich 11,2 % der Feldstücke als *konvexes* bzw. *konkaves Rechteck*, 39,3 % der Feldstücke als *konvexes* bzw. *konkaves Polygon hoher Rechteckigkeit* und 4,5 % der Feldstücke als *konvexes* bzw. *konkaves Dreieck* klassifizieren. 20,5 % der Feldstücke fallen in die Kategorie *stark konkaves Polygon* und 24,5 % der Parzellen sind der Kategorie *sonstige Form* zuzuordnen, wobei die letztgenannten eine Konvexität der Fläche von mehr als 0,8 aufweisen. Für absolute Zahlen sei auf Abbildung 139 des Anhangs (Abschnitt C.3) verwiesen.

Zwischen Acker- und Grünlandparzellen zeigen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Anteile verschiedener Formklassen. Die nach Art der Flächennutzung differenzierten Anteile sind in Abbildung 72 dargestellt. Bei Feldstücken mit Ackernutzung lassen sich ca. 63,7 % der Parzellen als *Rechteck* bzw. *Polygon hoher Rechteckigkeit* einstufen. Für Grünlandparzellen liegt der Anteil für diese Formklassen mit 35,3 % etwas über der Hälfte dessen der Ackerflächen. Der Anteil *stark konkaver Polygone* liegt bei Grünlandparzellen mit 33,2 % der Parzellen bei dem mehr als dreifachen Wert des Anteils dieser Formklasse bei Ackerflächen (9,6 %). Absolute Zahlen zu den einzelnen Formklassen sind der Abbildung 140 des Anhangs (Abschnitt C.3) zu entnehmen.

- konvexes Rechteck
- konvexes Poygon hoher Rechteckigkeit
- konvexes Dreieck
- kreisförmiges Polygon
- sonstiges Polygon
- ▨ konkaves Rechteck
- ▨ konkaves Poygon hoher Rechteckigkeit
- ▨ konkaves Dreieck
- stark konkaves Polygon

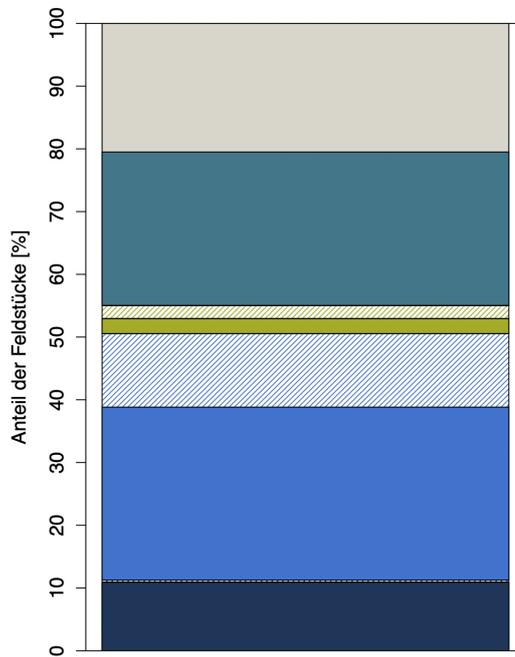


Abbildung 71: Feldstücksformen in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)

- konvexes Rechteck
- konvexes Poygon hoher Rechteckigkeit
- konvexes Dreieck
- kreisförmiges Polygon
- sonstiges Polygon
- ▨ konkaves Rechteck
- ▨ konkaves Poygon hoher Rechteckigkeit
- ▨ konkaves Dreieck
- stark konkaves Polygon

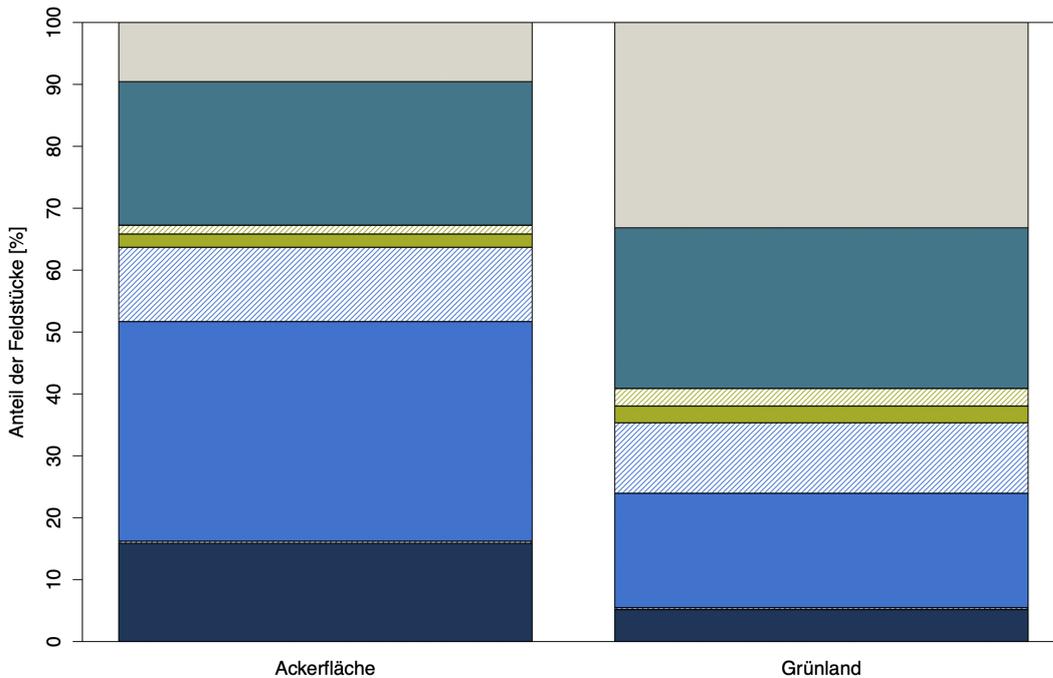


Abbildung 72: Feldstücksformen in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandparzellen (Stichtag: 01.06.2018)

7.5.4 Parametrische Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen

Aufgrund der Klassifikation von Parzellenformen ist es möglich, die Parzellen anhand form-spezifischer, geometrischer Parameter detaillierter zu charakterisieren. So zeigen die Abbildungen 73 und 74 die Summenhäufigkeitsfunktionen der Länge bzw. der Breite rechteckiger Feldstücke für Bayern. Als rechteckige Polygone sind in dieser Betrachtung *konvexe* und *konkave Rechtecke* sowie auch *konvexe* und *konkave Polygone hoher Rechteckigkeit* zusammengefasst.

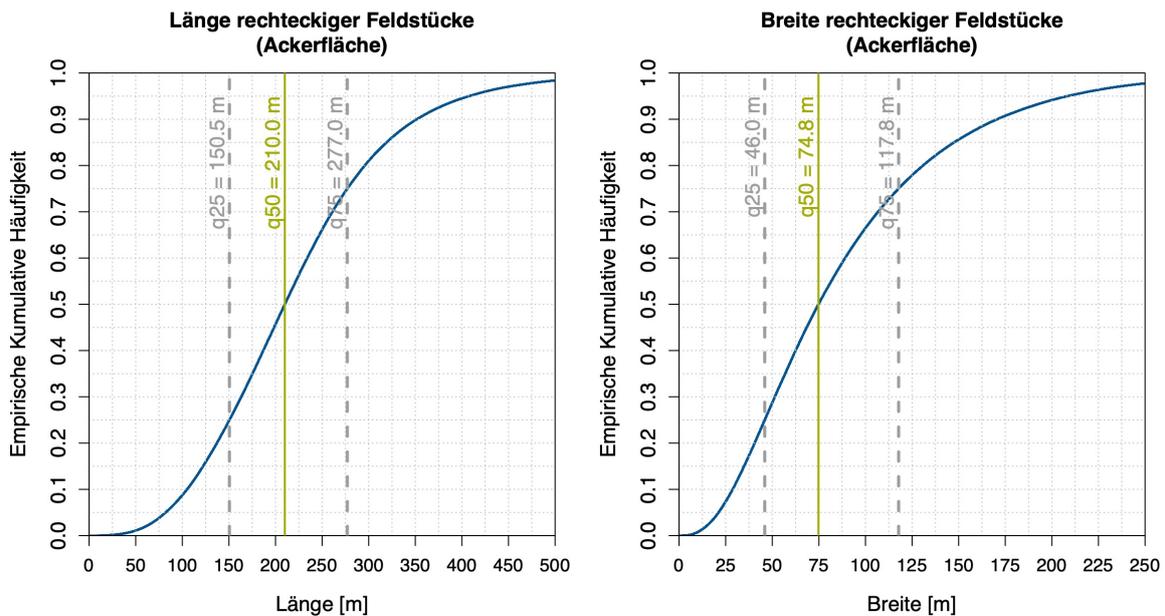


Abbildung 73: Summenhäufigkeitsfunktion der Länge und der Breite rechteckiger Feldstücke mit Ackernutzung (Stichtag: 01.06.2018)

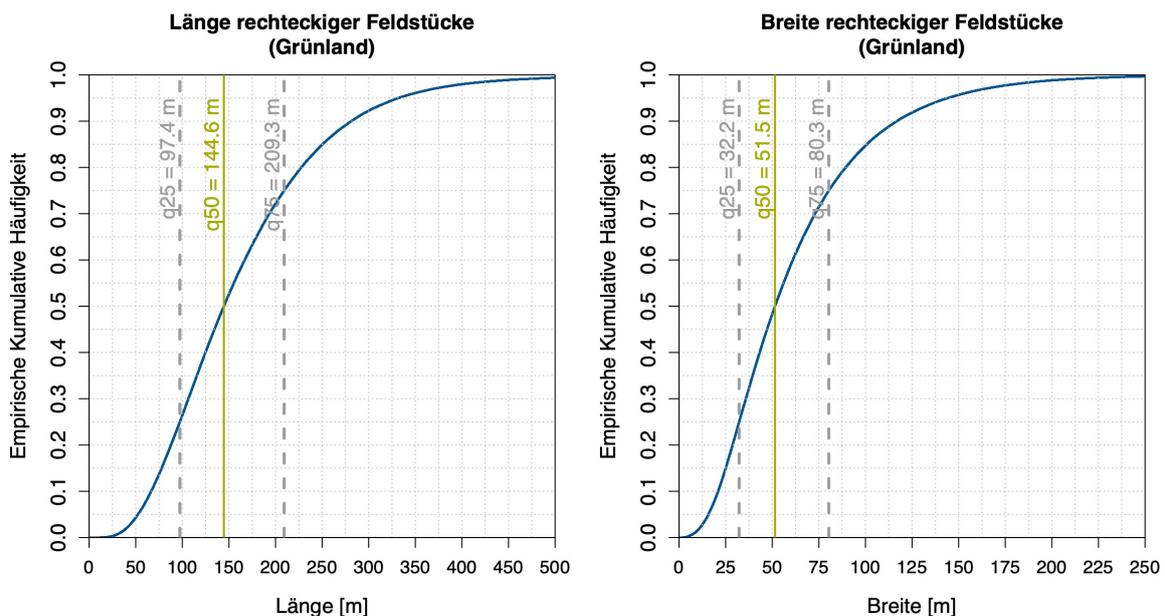


Abbildung 74: Summenhäufigkeitsfunktion der Länge und der Breite rechteckiger Feldstücke mit Grünlandnutzung (Stichtag: 01.06.2018)

Demnach weisen 75 % der Feldstücke mit Ackernutzung eine Länge von mehr als 150,5 m (q_{25}) bzw. weniger als 277,9 m (q_{75}) auf. 75 % der Feldstücke mit Ackernutzung besitzen eine Breite von mehr als 46,0 m (q_{25}) bzw. weniger als 117,8 m (q_{75}). Bei Grünlandparzellen zeigt sich für 75 % der rechteckigen Feldstücke eine Länge von mehr als 97,4 m (q_{25}) bzw. weniger als 209,3 m (q_{75}). Hinsichtlich der Breite lässt sich für 75 % der rechteckigen Grünlandparzellen eine Breite von mehr als 32,2 m (q_{25}) bzw. weniger als 80,3 m (q_{75}) beobachten. Länge und Breite rechteckiger Feldstücke liegen damit für Grünlandparzellen deutlich unterhalb derer von Ackerflächen.

Trotz der Unterschiede hinsichtlich der Abmessungen treten für rechteckige Acker- und Grünlandparzellen ähnliche *Länge : Breite-Verhältnisse* (LBV) auf. Abbildung 75 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktionen des LBV für rechteckige Feldstückspartellen. Demnach besitzen 75 % der Acker- und Grünlandparzellen ein LBV von mehr als 1,7 bzw. 1,6 : 1 (q_{25}). Gleichzeitig ist das LBV für 75 % der rechteckigen Acker- und Grünlandparzellen kleiner 4,2 bzw. 4,3 : 1 (q_{75}).

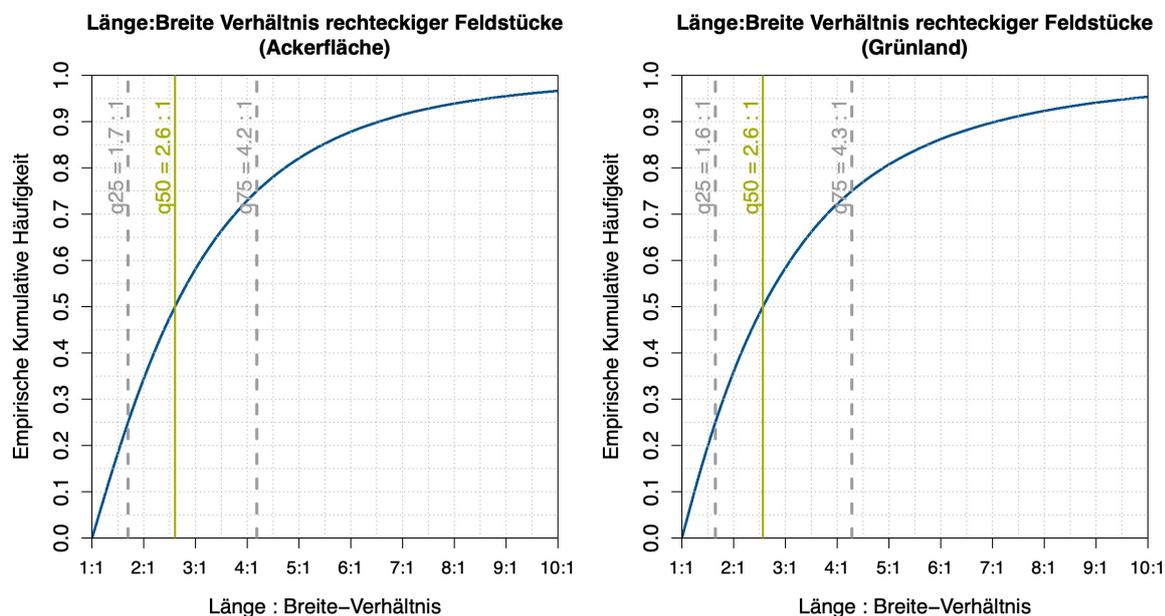


Abbildung 75: Summenhäufigkeitsfunktion des LBV rechteckiger Feldstücke mit Acker- (links) bzw. Grünlandnutzung (rechts) (Stichtag: 01.06.2018)

7.5.5 Regionalisierte Betrachtung von Feldstücksformen

Da sämtliche im Analyseprozess gewonnenen Informationen auf Ebene der jeweils kleinsten räumlichen Einheit vorliegen, lassen sich die Ergebnisse der Klassifikation auch regionalisiert betrachten. Abbildung 76 zeigt die regionalen Anteile rechteckig geformter Feldstückspolygone. Als rechteckig geformt gelten in dieser Darstellung neben *konvexen* und *konkaven Rechtecken* auch *konvexe* und *konkave Polygone hoher Rechteckigkeit*. Besonders hohe Anteile rechteckig geformter Feldstücke zeigen sich in den niederbayerischen Gäulagen, in weiten Teilen Unterfrankens, Nordschwaben und in der nördlichen Hälfte Oberbayerns.

Neben den Anteilen rechteckiger Feldstücke lassen sich auch geometrische Parameter von Parzellen dieser Formklassen regional differenzieren. Abbildung 77 veranschaulicht die regionalen Unterschiede des LBV weitestgehend rechteckiger Feldstückspolygone.

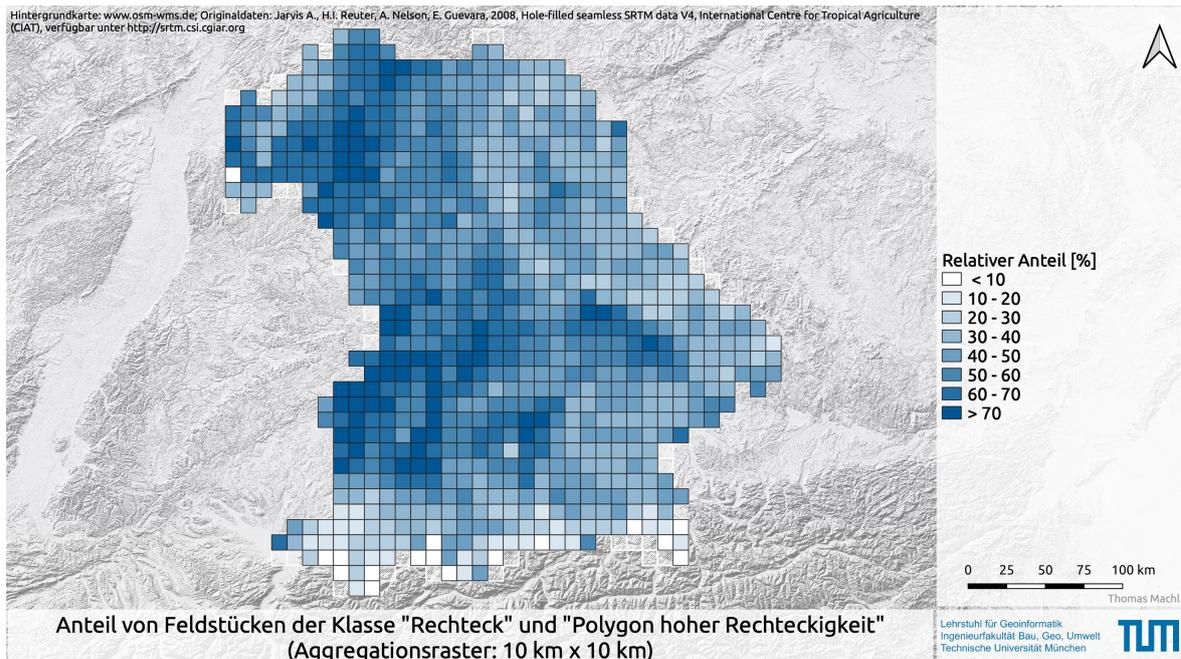


Abbildung 76: Relativer Anteil rechteckiger Feldstücke an der Gesamtanzahl der Parzellen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit

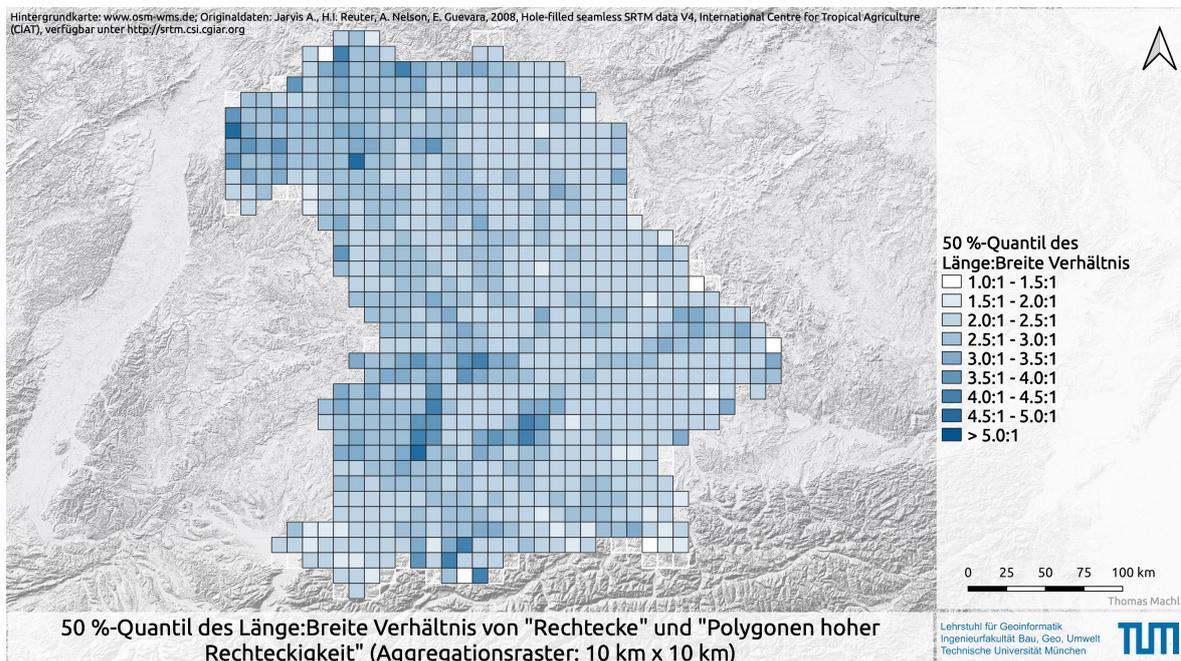


Abbildung 77: 50 %-Quantil Länge:Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit

In der landesweiten Betrachtung treten insbesondere Realteilungsgebiete in Teilen Unterfrankens sowie Teilen Schwabens mit einem im landesweiten Vergleich tendenziell weiten LBV – also eher langgestreckten Parzellen – hervor. Weiterführende Abbildungen zur regio-

nalen Verteilung verschiedener Formklassen von Feldstücken finden sich im Kapitel C.4 des Anhangs.

7.6 Diskussion des entwickelten Ansatzes

Die im Kontext des LandModell^{TUM} entwickelten Werkzeuge ermöglichen erstmals eine landesweit flächendeckende Analyse und Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen. Dabei gehen die Untersuchungen deutlich über die bestehenden Ansätze zur Beschreibung der Parzellenstrukturen hinaus, welche bislang fast ausschließlich über die Größe der Parzellen erfolgt. Zur Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen dienen Indikatoren, welche einerseits ein möglichst hohes Maß an Interpretierbarkeit (vgl. Wentz 1997) und andererseits eine Invarianz gegenüber Rotation, Translation und Skalierung aufweisen. Die gewählten Indikatoren können weitestgehend aus der Literatur übernommen werden. Im Hinblick auf die Klassifikation der Parzellenformen erfolgt eine Weiterentwicklung der Indikatoren. So dienen zur Beschreibung der Formen insbesondere auch Indikatoren, deren Fokus auf einer Charakterisierung der Form des konvexen Hüllpolygons liegt. In Kombination mit einer Quantifizierung der Konvexität – also der Abweichung zwischen einem Polygon und dessen konvexer Hülle – ermöglicht dieses Vorgehen eine bessere Differenzierung von Abweichungsursachen zwischen der Geometrie eines Polygons und den verschiedenen Referenzformen. In der vorliegenden Arbeit wird daher neben der Rechteckigkeit auch die Dreieckigkeit des konvexen Hüllpolygons zur Beschreibung sowie auch zur Klassifikation der Parzellenform herangezogen. Die Quantifizierung der Dreieckigkeit erfolgt in dieser Arbeit über einen neu entwickelten Ansatz, welcher die Form des konvexen Hüllpolygons mit der Geometrie des größten aus den Stützpunkten des konvexen Hüllpolygons zu bildenden Dreiecks vergleicht.

Die Klassifikation der Polygonform in die geometrischen Grundformen Rechteck, Dreieck und Kreis wird in dieser Arbeit über ein mehrstufiges Klassifikationsverfahren in Anlehnung an Machl (2012) und Machl et al. (2013) realisiert. Über Schwellwerte für verschiedene Indikatoren werden dabei die Parzellengeometrien den unterschiedlichen Formklassen zugeordnet. Die gesetzten Indikatorgrenzwerte sind das Ergebnis einer visuellen Kalibrierung. Damit sind die Ergebnisse der Klassifikation auch abhängig von den gesetzten Einstellungen. Aufgrund der visuellen Kalibrierung besitzen die Ergebnisse der Klassifikation jedoch eine gute Übereinstimmung mit der menschlichen Wahrnehmung von Polygonformen. Über nutzerdefinierbare Eingangsparameter lassen sich im Klassifikationswerkzeug die Grenzwerte anpassen, um – in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Fragestellung – eine entsprechende Trennschärfe erzielen zu können. Um detailliertere Aussagen insbesondere zu als *stark konkaves Polygon* klassifizierten Parzellen treffen zu können, sollen in weiterführenden Arbeiten Ansätze zur Dekomposition komplexer Geometrieobjekte näher untersucht werden. Erste prototypische Ansätze in diese Richtung wurden im Kontext des LandModell^{TUM} bereits von Fischl (2015) unternommen. Die Dekomposition von Parzellen bzw. eine Unterteilung von Parzellen in Teilbeete ist zudem eine grundlegende Voraussetzung für die Abschätzung von Fahrspuren im Feld (vgl. Oksanen 2007). Diese wiederum sind Ausgangspunkt für eine Bewertung des von der Parzellenform bestimmten Arbeitszeitaufwands bzw. den mit der Bewirtschaftung verbundenen (Maschinen-)Kosten. In den Betrachtungen sollte künftig auch die dritte Dimension als grundlegende Einflussgröße mit berücksichtigt werden.

Sämtliche im Analyseprozess gewonnene Information fließt im Sinne einer semantischen Anreicherung zurück zu den betreffenden Objekten und steht damit für weiterführende Ana-

lysen zur Verfügung. Aufgrund dieses Prinzips lassen sich die Ergebnisse der auf Ebene von Einzelparzellen durchgeführten Analysen für ein landesweites Monitoring der bestehenden Parzellenstrukturen einsetzen. Somit lassen sich neben regionalen Größenstrukturen, auch regionale Anteile verschiedener Formklassen sowie auch charakteristische Geometrieparameter betrachten. Die im Kontext dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse verstehen sich daher als Grundlage für weiterführende agrarökonomische und agrarstrukturelle Betrachtungen, so dass die hier dargestellten Ergebnisse lediglich einen Eindruck der Bandbreite möglicher Analysen vermitteln können.

8 Werkzeug zur Analyse von Hof-Feld-Transportpfaden

„Die Landwirtschaft ist ein Transportgewerbe wider Willen“ – mit dieser Aussage fasste Arthur Schurig-Markee (1861 - 1932) (zitiert in Heuser 1952) bereits vor rund 100 Jahren die große Bedeutung von Transportarbeiten in der Landwirtschaft treffend zusammen. Nach Schätzungen von Bernhardt et al. (2005), Götz et al. (2011) bzw. Mederle et al. (2015) beläuft sich die Summe der innerbetrieblich transportierten Güter in der Landwirtschaft für Deutschland auf eine Gesamtmasse von rund 410 bis 500 Mio. t. Zwar liegt die Landwirtschaft damit hinsichtlich der transportierten Massen hinter dem Güterkraftverkehr (3200 bis 3500 Mio. t) jedoch noch deutlich vor Eisenbahn (317 bis 365 Mio. t) und Binnenschifffahrt (229 bis 235 Mio. t) (Bernhardt et al. 2005; Götz et al. 2011; Mederle et al. 2015). Abbildung 78 fasst die Massenanteile verschiedener landwirtschaftlicher Transportgüter in Deutschland zusammen.

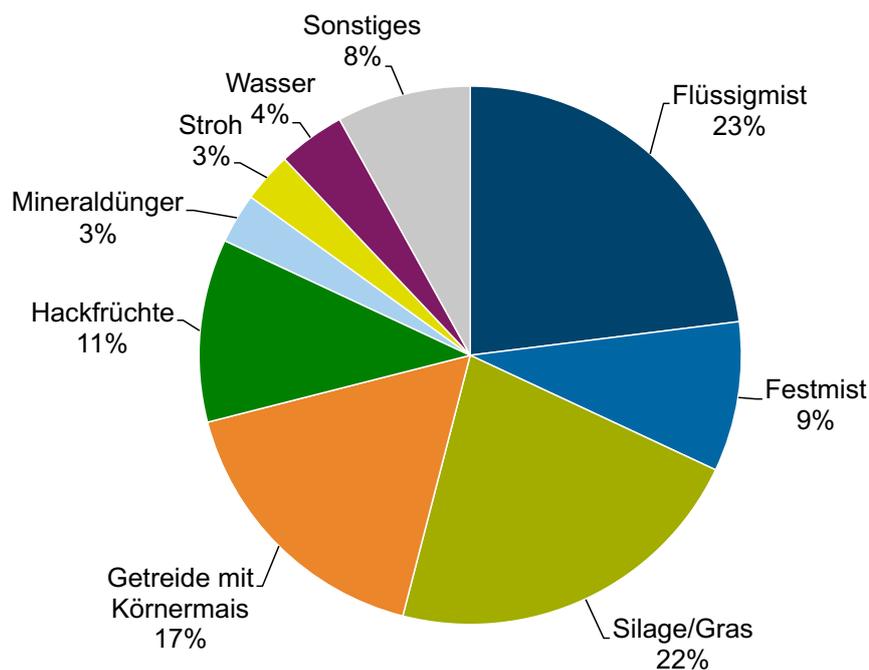


Abbildung 78: Massenanteile verschiedener Transportgüter in der deutschen Landwirtschaft (eigene Darstellung nach Bernhardt et al. 2005)

Je nach strukturellen Gegebenheiten und betrieblicher Ausrichtung können Transport, Umschlag und Lagerung landwirtschaftlicher Güter rund 30 - 60 % des Gesamt-Arbeitszeitbedarfs in der Außenwirtschaft einnehmen (Demmel 2014; Fröba 1994; LfL 2008; Mederle et al. 2015). Der Transport landwirtschaftlicher Güter erfolgt dabei schwerpunktmäßig innerbetrieblich, also insbesondere zwischen den Hofstellen und den jeweils zugehörigen landwirtschaftlichen Parzellen (Bernhardt et al. 2005; Fröba 1994). Nach Demmel (2006, S. 159) werden rund 75 % der in landwirtschaftlichen Betrieben anfallenden Trans-

portmassen innerbetrieblich transportiert. Fröba (1994) geht davon aus, dass in Deutschland je Jahr und Hektar durchschnittlich rund 40 Tonnen unterschiedlichster Güter zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und der jeweiligen Hofstelle transportiert werden. Das Transportaufkommen und auch die Art der transportierten Güter unterliegen hierbei je nach Betriebsausrichtung und angebauten Kulturen erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen bzw. Unterschieden (Bernhardt et al. 2005; Bernhardt und Weise 2001; Fröba 1994; Götz et al. 2011; Mederle et al. 2015).

Die mit dem Transport von Erntegütern, wirtschaftseigenen oder zugekauften Betriebsmitteln sowie auch die mit der Anfahrt landwirtschaftlicher Parzellen verbundenen ökonomischen und ökologischen Effekte (z.B. entstehende Kosten, Treibhausgasemissionen, etc.) sind dabei unmittelbar von den zurückzulegenden Distanzen und damit insbesondere auch von der Entfernung zwischen Hofstelle und Parzelle abhängig. Neben geometrischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Parzellen (Form und Größe) besitzt die Hof-Feld-Transportentfernung je nach Arbeitsverfahren zudem einen nicht unwesentlichen Einfluss auf Arbeitszeitbedarf, Flächenleistung, Kraftstoffverbrauch und dadurch in Summe auf die anfallenden Arbeitserledigungskosten (vgl. Fröba und Funk 2004; KTBL o.D., 2009; Wagner und Seufert 2000). Insbesondere unter kleinstrukturierten Bedingungen können sich Transportentfernungen unmittelbar negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe bzw. Betriebszweige sowie die Rentabilität der Bewirtschaftung einzelner landwirtschaftlicher Parzellen auswirken. Ursächlich hierfür sind insbesondere zweierlei Aspekte anzuführen: einerseits sind unter kleinstrukturierten Flächenstrukturen bei identischer Gesamtfläche gegenüber größeren Flächenstrukturen mehr Parzellen anzufahren und andererseits verteilen sich die Kosten für die Anfahrt einzelner Parzellen unter kleinstrukturierten Bedingungen auf eine geringere Fläche, weshalb aufgrund fehlender Degression flächenbezogene Transportkosten höher ausfallen.

Hinsichtlich der Hof-Feld-Transportdistanzen bestehen - nicht zuletzt aufgrund unterschiedlicher Betriebs-, Flächen- und Verkehrsinfrastrukturen sowie lokaler topographischer Gegebenheiten - deutliche regionale Unterschiede. So weist Fröba (1994) auf ungleiche Hof-Feld-Transportdistanzen im früheren Bundesgebiet und in den neuen Bundesländern hin.

Strukturelle Veränderungen in der Landwirtschaft haben insbesondere in früheren Bundesgebiet zu einer Intensivierung der Transportprozesse beigetragen. Neben dem zumeist pachtbasierten Wachstum der Betriebsgrößen hat insbesondere auch die Ausweitung des Anbaus von Energiepflanzen zur Entstehung neuer Transportbeziehungen sowie auch zu einer zunehmenden Bedeutung des Transportgeschehens in der Landwirtschaft beigetragen. Landwirtschaftliche Parzellen liegen nicht selten verstreut und in größerer Distanz zu den Hofstellen, weshalb überregionale Transportbeziehungen zunehmend an Bedeutung gewinnen (Bromma 2014; Soboth 2012; Süß 2014). In der Literatur ist vor diesem Hintergrund vielfach von zunehmenden Transportdistanzen die Rede (DWA 2016; Lehmigk-Emden 2012; Soboth 2012).

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Entwicklung von Konzepten und Methoden für ein landesweites Monitoring von Hof-Feld-Transportpfaden. Zunächst folgt eine Darstellung des Stand des Wissens zu Transportentfernungen in der Landwirtschaft, bevor Forschungsfragen benannt und Konzepte zur Abschätzung bestehender Transportpfade dargestellt werden. Nach einer Beschreibung der entwickelten Werkzeuge und der Darstellung grundlegender Ergebnisse erfolgt eine Evaluierung der durchgeführten Schätzung. Abschließend werden Konzepte, Werkzeuge und Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

8.1 Stand des Wissens zu Hof-Feld-Transportentfernungen

Trotz der eingangs bereits dargestellten Bedeutung des Transportgeschehens in der Landwirtschaft für verschiedenste, zumeist ökonomische bzw. betriebswirtschaftliche Fragestellungen (stellvertretend: Auburger und Bahrs 2016; Döring et al. 2010; LfL 2008; Strobl 2013; Stürmer und Eder 2010) fehlen bislang detaillierte, belastbare und regional differenzierte Angaben zu bestehenden Hof-Feld-Transportentfernungen in der Landwirtschaft. Verfügbare Angaben stützen sich vielfach auf Befragungen (Bernhardt 2002; Bernhardt und Weise 2001), auf die Einschätzung von Experten oder lokal stark begrenzte Erhebungen (stellvertretend: Kapfer 2007). In der Literatur finden sich daher unterschiedliche und zumeist stark einzelfallbezogene Angaben zu bestehenden Transportdistanzen. Als Ergebnis einer bundesweiten Befragung von 92 landwirtschaftlichen Betrieben finden sich in Bernhardt und Weise (2001) nach Betriebsausrichtung und -größe differenzierte Angaben zu Transportentfernungen in der Landwirtschaft. In der Untersuchung beträgt die durchschnittliche Transportentfernung für Marktfruchtbetriebe zwischen 2 km und knapp 7 km („kleine“ Betriebe: 2,13 km, „mittlere“ Betriebe: 3,95 km, „große“ Betriebe: 6,71 km). Für Futterbaubetriebe bewegen sich die Transportentfernungen ebenfalls in einer Größenordnung zwischen knapp 2 km und 7 km („kleine“ Betriebe: 1,93 km, „mittlere“ Betriebe: 3,20 km, „große“ Betriebe: 7,00 km). Bei Gemischtbetrieben zeigt sich in der Untersuchung eine Transportentfernung zwischen 2,81 km („mittlere“ Betriebe) und 4,82 km („große“ Betriebe).

Als mittlere Hof-Feld-Transportentfernung in Deutschland geben Bernhardt et al. (2005) und Reckleben et al. (2013) einen Wert von ca. 4 km an (Bernhardt et al. 2005: 3,9 km; Reckleben et al. 2013: 4 km). Im Bereich der Biomasselogistik von Biogasanlagen finden sich in der Literatur Angaben zu Transportentfernungen in einer Größenordnung zwischen 2,0 km (LfL 2008) und 7,5 km (KTBL 2013).

Aufgrund der bereits erwähnten, unzureichenden Verfügbarkeit belastbarer Angaben stützen sich zahlreiche Betrachtungen auf stark vereinfachte Annahmen. Vielfach beschränken sich die Untersuchungen entweder auf eine rein distanzabhängige Betrachtung ökonomischer Aspekte (stellvertretend: LfL 2008) oder sie stützten sich auf stark vereinfachte Ansätze zur Ableitung von Transportentfernungen beispielsweise aus Hof-Feld-Luftlinienentfernungen, welche teils über Korrekturfaktoren angepasst werden (vgl. Auburger und Bahrs 2016; Hahn und Fröba 2013; Schulze Steinmann und Holm-Müller 2010).

Sämtliche der hier vorgestellten Angaben bzw. Ansätze beinhalten weder eine räumliche bzw. zeitlich differenzierte Betrachtung zu regional typischen Transportdistanzen noch ermöglichen sie eine Plausibilisierung ihrer regionalen bzw. zeitlichen Gültigkeiten. Damit sind auch sämtliche daraus abgeleiteten Aussagen grundsätzlich nur bedingt belastbar und aus diesem Grund auch nur unzureichend für regional differenzierte Untersuchungen geeignet.

Der in Machl et al. (2016) vorgestellte Ansatz ermöglicht erstmals eine landesweit flächendeckende Ableitung belastbarer und regional differenzierter Angaben zu Transportdistanzen in der Landwirtschaft. Die in der Arbeit entwickelten Konzepte, Methoden und Werkzeuge bilden auch die Grundlage dieses Kapitels.

8.2 Forschungsfragen

Im Zusammenhang mit der Abschätzung landwirtschaftlicher Hof-Feld-Transportpfade sind sowohl Forschungsfragen aus dem Bereich der Agrarwissenschaften bzw. der Ländlichen Entwicklung wie auch Forschungsfragen aus dem Bereich der Geoinformatik zu bearbeiten. Als Forschungsfragen für den Bereich Ländliche Entwicklung bzw. Landwirtschaft sind zu benennen:

1. Wie groß sind Hof-Feld Transportdistanzen in der Landwirtschaft im Allgemeinen?
2. Bestehen regionale Unterschiede hinsichtlich der Hof-Feld-Transportdistanzen und wie groß sind diese?
3. Wie lässt sich die Qualität der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an die Hofstellen objektiv bewerten?

Voraussetzung für die Bearbeitung der angeführten Fragestellungen ist die Beantwortung folgender Forschungsfragen aus dem Bereich der (Geo-)Informatik:

1. Wie ist ein Werkzeug zu konzipieren, um mit hoher Performanz und Detailschärfe eine landesweit flächendeckende Abschätzung sämtlicher Hof-Feld-Transportpfade durchführen zu können?
2. Ist es basierend auf landesweit verfügbaren Geodaten zur Lage von Hofstellen und landwirtschaftlichen Parzellen sowie auf Grundlage von Geodaten zum Verkehrsnetz möglich, Hof-Feld-Transportpfade detailliert und realitätsnah abzuleiten?
3. Wie lassen sich ungleiche Präferenzen des landwirtschaftlichen Transportverkehrs für verschiedene Wegekategorien in den Analysen berücksichtigen?
4. Wie sind einzelne Transportpfade abzubilden, um eine größtmögliche Flexibilität für weiterführende Analysen zu gewährleisten?
5. Wie lässt sich die Realitätsnähe der ermittelten Pfade objektiv quantifizieren?

8.3 Konzeptionelle Überlegungen

In diesem Abschnitt soll zunächst auf die konzeptionellen Überlegungen zur Abschätzung der Hof-Feld-Transportpfade eingegangen werden. Anschließend folgt eine Darlegung der Konzepte zur detaillierten Abbildung der ermittelten Transportpfade im Informationsmodell.

8.3.1 Konzeptionelle Überlegungen zur Abschätzung von Hof-Feld-Pfaden

Die grundsätzliche Überlegung bei der Abschätzung von Hof-Feld-Transportpfaden besteht darin, innerhalb des Verkehrsnetzes kostenminimale Pfade zwischen Parzellen und den jeweiligen Hofstellen zu ermitteln. Dabei gelten insbesondere folgende Annahmen:

1. Adresse des Betriebsinhabers entspricht der Lage der Hofstelle.

2. Transportwege zwischen Hofstellen und Feldern entsprechen jeweils dem Pfad mit den geringsten Kosten
3. Start- bzw. Endpositionen eines Pfades befinden sich entlang von Wegsegmenten im Umfeld einer Parzelle bzw. einer Hofstelle

Das Konzept zur Abschätzung der Hof-Feld-Transportpfade untergliedert sich insgesamt in fünf Teilschritte: Um ungleiche Präferenzen für unterschiedliche Wegekategorien bei der Pfadabschätzung berücksichtigen zu können, sind den einzelnen Wegsegmenten zunächst Kosten zuzuweisen. In einem zweiten Schritt werden zunächst für jede Hof-Feld-Fahrbeziehung mögliche Ausgangspositionen einer Pfadabschätzung im Umfeld von Parzellen und Hofstellen ermittelt. Dabei werden neben der Positionsermittlung möglicher Ausgangspunkte auch die Kosten für die Überwindung der Strecke zwischen möglichen Ausgangspositionen und tatsächlichen Knoten des Netzwerks entlang von Wegsegmenten berechnet. Im dritten Schritt erfolgt dann die Berechnung der Pfade zwischen den für eine Hof-Feld-Fahrbeziehung infrage kommenden, tatsächlichen Knoten des Verkehrsnetzwerks unter Minimierung der Kostensumme. Im vierten Schritt sind die Kosten zwischen Ausgangspositionen entlang der Wegsegmente mit den Pfadkosten zwischen den infrage kommenden, tatsächlichen Knoten zusammenzuführen und die Gesamtkosten für eine Fahrbeziehung zu ermitteln. Aus der Menge der ermittelten Pfade zwischen den Ausgangs- und Zielpositionen lässt sich nun für jede Hof-Feld-Fahrbeziehung diejenige Kombination selektieren, welche die minimale Gesamtkostensumme aufweist. Im fünften Schritt erfolgt dann die Ausgabe der Bestandteile des Pfades mit den geringsten Kostensumme.

Die folgenden Abschnitte beleuchten die Details der Pfadberechnung. Die Untergliederung orientiert sich an den fünf beschriebenen Teilschritte zur Berechnung der Transportpfade.

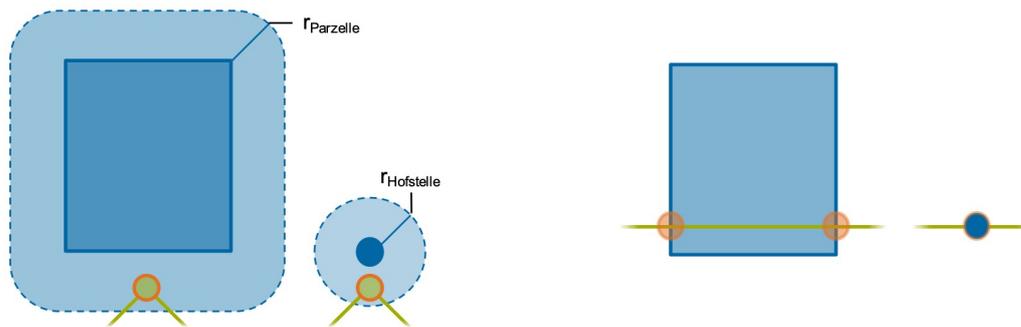
8.3.1.1 Abbildung ungleicher Präferenzen für verschiedene Wegekategorien

Im Rahmen der Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass sich die Kosten für die Nutzung eines Wegsegments einerseits aus einer Präferenz für bestimmte Wegekategorien und andererseits aus der Länge eines Wegsegments ergeben. Die Artikulation ungleicher Präferenzen des landwirtschaftlichen Verkehrs für verschiedene Arten von Verkehrswegen erfolgt in Form von angenommenen Fahrgeschwindigkeiten für unterschiedliche Wegekategorien. Aus der Länge eines Wegsegments und der segmentspezifischen Fahrgeschwindigkeit kann die zur Befahrung des Segments erforderliche Fahrzeit ermittelt werden, welche im weiteren Verlauf als Kosten für die Nutzung eines Segments gilt. Dazu ist lediglich die Länge eines Segments mit der Fahrzeit je Längeneinheit (= Kehrwert der jeweils angenommenen Fahrgeschwindigkeit) zu multiplizieren. Die angenommenen Fahrgeschwindigkeiten sind im Abschnitt 8.4.3 zusammengestellt.

8.3.1.2 Bestimmung potentieller Ausgangspositionen der Pfadberechnung

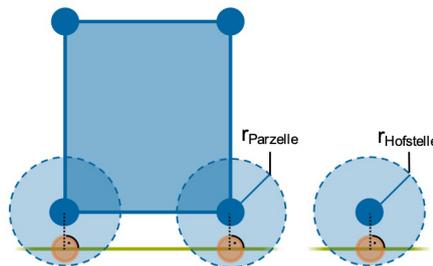
Aus der Geometrie landwirtschaftlicher Parzellen und Hofstellen und der Geometrie der Wegsegmente (= Netzwerkkanten) sind zunächst mögliche Ausgangspositionen der Pfadberechnung abzuleiten. Diese Ausgangspositionen befinden sich innerhalb eines nutzerdefinierbaren Suchradius im Umfeld von Parzellen (r_{Parzelle}) bzw. Hofstellen ($r_{\text{Hofstelle}}$) entlang von Segmenten des Verkehrswegenetzes. Als mögliche Ausgangspositionen kommen dabei in Betracht:

- nächstgelegener Punkt der Geometrie eines Wegsegments zur Geometrie einer Parzelle bzw. Hofstelle, einschließlich tatsächlicher Knoten des Netzwerkes (siehe Abbildung 79a),
- Schnittpunkte der Geometrie einer Parzelle bzw. einer Hofstelle mit der Geometrie eines Verkehrswegs (siehe Abbildung 79b) und
- senkrechte Projektion der Stützpunkte eines Polygons auf Segmente des Verkehrsnetzes (siehe Abbildung 79c)



(a) nächstgelegene Position der Geometrie des Wegsegments zur Geometrie der Parzelle bzw. Hofstelle

(b) Schnittpunkte der Geometrie einer Parzelle bzw. Hofstelle mit Segmenten des Wegenetzes



(c) senkrechte Projektion der Stützpunkte einer Parzelle bzw. Hofstelle auf Segmente des Verkehrsnetzes

Abbildung 79: Mögliche Ausgangspositionen (orange) eines Hof-Feld-Transportpfades im Umfeld landwirtschaftlicher Parzellen bzw. Hofstellen (blau) entlang von Segmenten des Verkehrsnetzes (grün)

Zur Ableitung der Pfadkosten zwischen den ermittelten Ausgangspositionen und tatsächlichen Knoten des Netzwerkes (= Start- und Endpunkt eines Segments) sind die potentiellen Ausgangspositionen entlang der betreffenden Wege relativ zum Start- und Endpunkt des jeweiligen Segments zu verorten und anschließend die Kosten bis zum Erreichen eines Netzknotens anteilig an den Gesamtkosten eines Segments zu ermitteln. Die Verortung der Ausgangspunkte entlang der linienhaften Wegsegmente folgt dem Ansatz eines interpolierenden, linearen Referenzierungsverfahrens im Sinne der ISO-Norm *DIN EN ISO 19148 Geoinformation - Lineares Bezugssystem* (ISO 2012).

Abbildung 80 verdeutlicht das gewählte Vorgehen anhand des Beispiels einer interpolierenden Verortung des Punktes A entlang der linienhaften Repräsentation der Netzwerkkante

e sowie die Ermittlung der anteiligen Pfadkosten zum Start- bzw. Endpunkt des Segments. Durch lineare Interpolation entlang des Liniensegments e in Zeichenrichtung lässt die Relativposition des Punkts A ($Position_{relativ}(A)$) bezogen auf den Startpunkt und auch auf die Gesamtlänge des Segments e ($Länge(e)$) angegeben. Die Pfadkosten zwischen dem linear verorteten Punkt A und dem Startpunkt (S_e) des Linienzugs (= Startknoten v_S) entlang von e ($Kosten(A \rightarrow S_e)$) lassen sich wie angegeben anteilig an den Gesamtkosten der Kante e ($Kosten(e)$) ermitteln. Analog können für den Punkt A die Kosten ($Kosten(A \rightarrow E_e)$) entlang von e bis zum Endpunkt (E_e) des Linienzugs (= Endknoten v_E) berechnet werden.

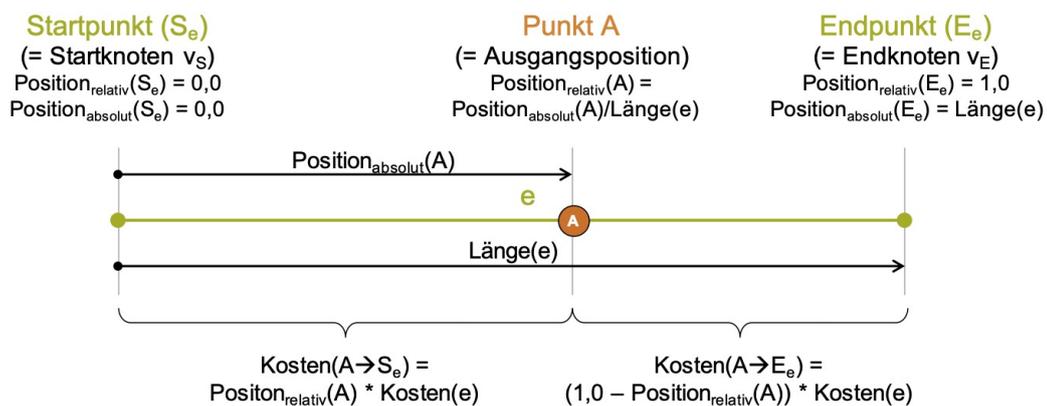


Abbildung 80: Prinzip der linearen Verortung eines Punktes A entlang der geometrischen Repräsentation der Kante e und anteilige Berechnung der Kosten zwischen dem Punkt A und dem Startpunkt S_e ($Kosten(A \rightarrow S_e)$) bzw. dem Endpunkt E_e ($Kosten(A \rightarrow E_e)$) bezogen auf die Gesamtkosten der Kante e ($Kosten(e)$)

Aus der Kenntnis potentieller Ausgangspositionen entlang von Segmenten des Wegenetzes lassen sich zugleich infrage kommende, tatsächliche Start- und Zielknoten für eine Pfadabschätzung ableiten. Abbildung 81 veranschaulicht die gewählte Vorgehensweise anhand eines Beispiels. Im Beispiel sind neben der Bezeichnung von Knoten und Kanten auch in Klammern die Kosten für die Nutzung einer Kante angegeben. Als denkbare Ausgangssegmente eines kostenminimalen Pfades kommen im Umfeld von der Hofstelle lediglich das Segment e_{12} sowie im Bereich der Parzelle die Segmente e_4 und e_5 in Betracht. Entlang dieser Segmente lassen sich nach dem bereits erläuterten Prinzip mögliche Ausgangspositionen eines kostenminimalen Pfades im Bereich der Parzelle (P_1 , P_2 und P_3) wie auch im Umfeld der Hofstelle (H_1) lokalisieren. Gleichzeitig können die Kosten des Teilpfades zwischen einem möglichen Ausgangspunkt und einem tatsächlichen Knoten des Wegenetzes angegeben werden. Für jede Kombination aus Parzelle bzw. Hofstelle und infrage kommenden, tatsächlichen Knoten des Wegenetzes lassen sich nun diejenigen Ausgangspositionen mit den geringsten Kosten zu einem Netzwerkknoten selektieren. So kommen als Startknoten eines kostenminimalen Pfades für die Hofstelle sowohl Knoten v_8 als auch Knoten v_{11} infrage. Im Umfeld der Parzelle sind die Knoten v_3 , v_4 und v_5 denkbare Zielknoten eines möglicherweise kostenminimalen Pfades, wobei P_1 über e_5 zu v_4 , P_2 entlang von e_5 zu v_5 und P_3 längs e_4 zu v_3 die jeweils geringsten Kosten zu einem Knoten des Netzwerks aufweisen. Die Teilpfade von P_3 entlang von e_4 zu v_5 , von P_1 über e_5 nach v_5 wie auch von P_2 passierend e_5 zu v_4 weisen jeweils verglichen mit alternativen Pfaden zu infrage kommenden Knoten des Netzwerks jeweils höherer Kosten auf und sind daher im Weiteren nicht mehr zu berücksichtigen.

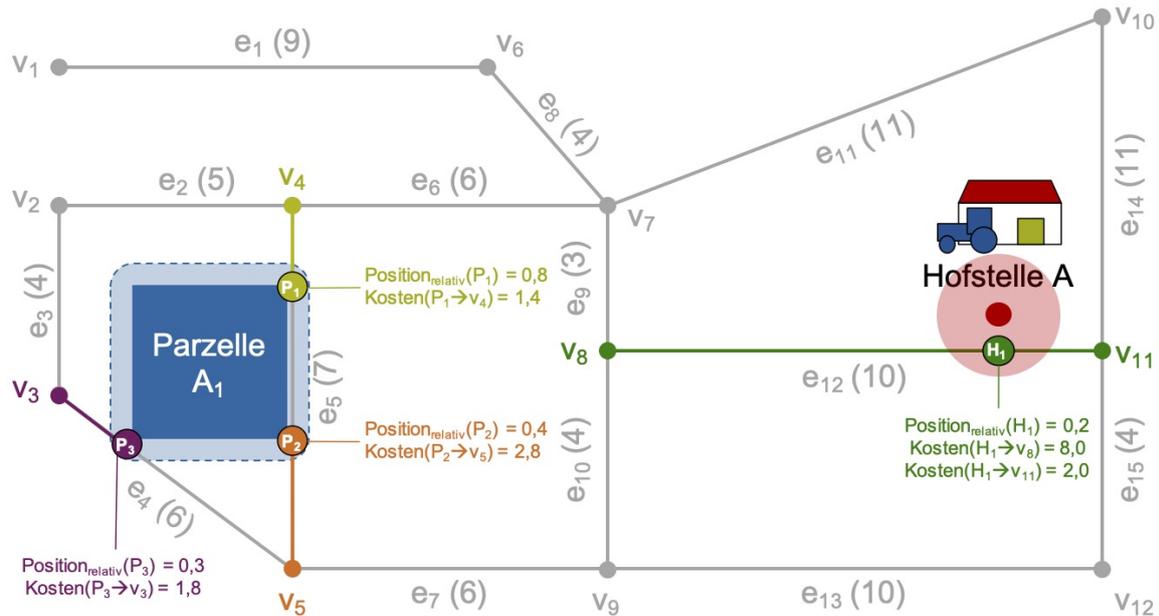


Abbildung 81: Ermittlung möglicher Start- bzw. Zielknoten eines kostenminimalen Pfades zwischen einer Hofstelle und einer Parzelle

8.3.1.3 Berechnung minimaler Kostensummen zwischen Start- und Zielknoten

Für jede Kombination infrage kommender Knoten des Wegenetzes im Umfeld einer Hofstelle (*Startknoten*) bzw. Parzelle (*Zielknoten*) lassen sich in einem nächsten Schritt unter Minimierung der Kosten jeweils die Pfade sowie auch Kostensummen ermitteln. Im angeführten Beispiel (Abbildung 81) sind die minimalen Pfadkosten ausgehend von den Ausgangsknoten v_8 und v_{11} hin zu den Zielknoten v_3 , v_4 und v_5 zu ermitteln. Diese Berechnung lässt sich mit Hilfe bekannter Kürzeste-Wege Algorithmen, beispielsweise dem Algorithmus nach Dijkstra (1959), durchführen.

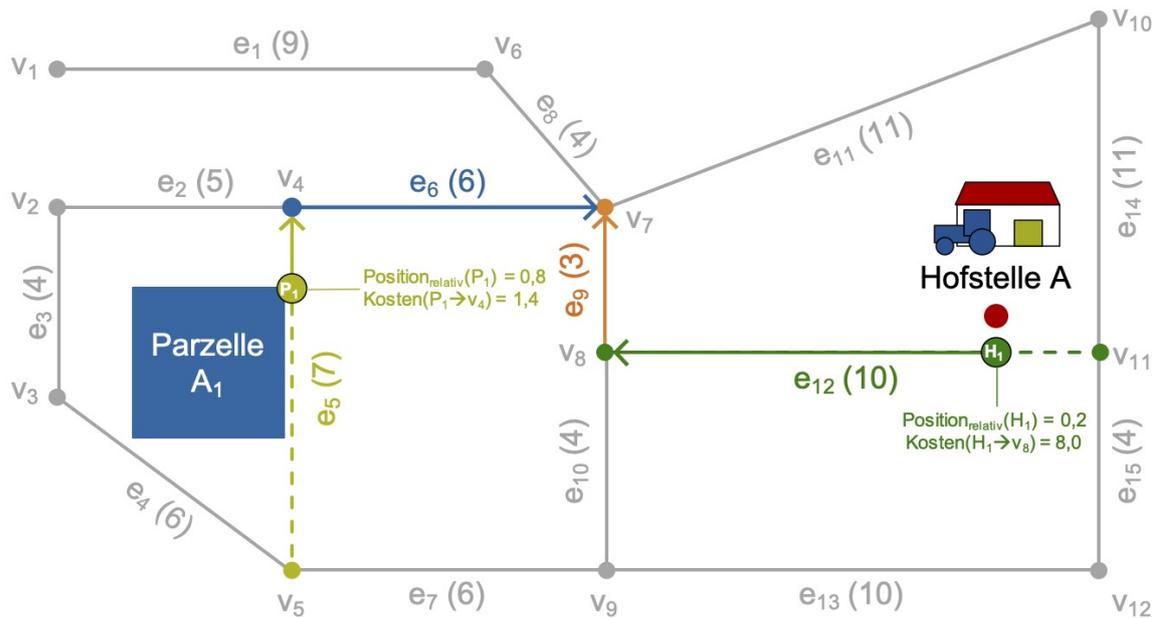
8.3.1.4 Berechnung der Pfadkosten und Selektion des kostenminimalen Pfades

Durch Zusammenführung der ermittelten minimalen Kosten zwischen potentiellen Ausgangspositionen im Umfeld der Hofstelle bzw. der Parzelle und den jeweiligen Start- bzw. Zielknoten mit den minimalen Kostensummen zwischen den tatsächlichen Knoten des Netzwerks lassen sich die Gesamtkosten des jeweiligen Pfades angeben. Aus der Menge möglicher Kombinationen der Ausgangspositionen lässt sich nun für jede Fahrbeziehung die Konstellation mit minimalen Gesamtkosten selektieren.

Für das angeführte Beispiel in Abbildung 81 weist der Pfad zwischen P_1 und H_1 über die physischen Netzwerkknoten v_4 und v_8 mit 18,5 Kosteneinheiten die minimale Gesamtkostensumme aller Kombinationen aus möglichen Ausgangspunkten auf.

8.3.1.5 Ausgabe der kostenminimalen Hof-Feld-Pfade

Die Speicherung der kostenminimalen Pfade erfolgt kleinteilig in Form von Referenzen auf die beteiligten Objekte *Parzelle*, *Hofstelle* und *beteiligte Wegsegmente*. Diese Form der kleinteiligen Abbildung der Pfade als linear referenzierte Verweise auf einzelne Objekte gewährt vollständigen Zugriff auf Informationen zu den jeweils beteiligten Komponenten, was die Vielfalt weiterführender Analysen deutlich erweitert. Abbildung 82 verdeutlicht das Prinzip anhand des bereits eingeführten Beispiels.



Hofstelle	Parzelle	Index	Kante	von	bis
A	A ₁	0	e ₁₂	0,2	1,0
A	A ₁	1	e ₉	0,0	1,0
A	A ₁	2	e ₆	1,0	0,0
A	A ₁	3	e ₅	1,0	0,8

Abbildung 82: Ableitung eines kostenminimalen Pfades zwischen einer Hofstelle A und einer Parzelle A₁ (Kantengewichte in Klammern angegeben); kleinteilige Abbildung der resultierenden Pfade über Referenzen auf die beteiligten Objekte

Der Pfad zwischen Startposition H₁ und Zielposition P₁ zerfällt in seine Bestandteile: zunächst ist ausgehend von der Hofstelle A bzw. Position H₁ das Segment e₁₂ in Zeichenrichtung zwischen Position 0,2 und dem Knoten v₈ bei Position 1,0 zu überstreichen, bevor die Segmente e₉ und e₆ vollständig in (Position 0,0 bei v₈ bis Position 1,0 bei v₇) bzw. entgegen der Zeichenrichtung (Position 1,0 bei v₇ bis Position 0,0 bei v₄) zu passieren sind. Entlang des Segments e₅ entgegen der Zeichenrichtung führt der Pfad schließlich zu P₁ bei Position 0,8 und erreicht die Parzelle A₁.

8.3.2 Konzeptionelle Überlegungen zur Erweiterung des Informationsmodells

Die kleinteilige Abbildung von Transportpfaden in Form einzelner Pfadbestandteile erfordert eine semantische Erweiterung des Informationsmodells. Diese ist Bestandteil des Pakets *AgriculturalTransportation*, dessen Inhalt als UML-Klassendiagramm in Abbildung 83 dargestellt ist.

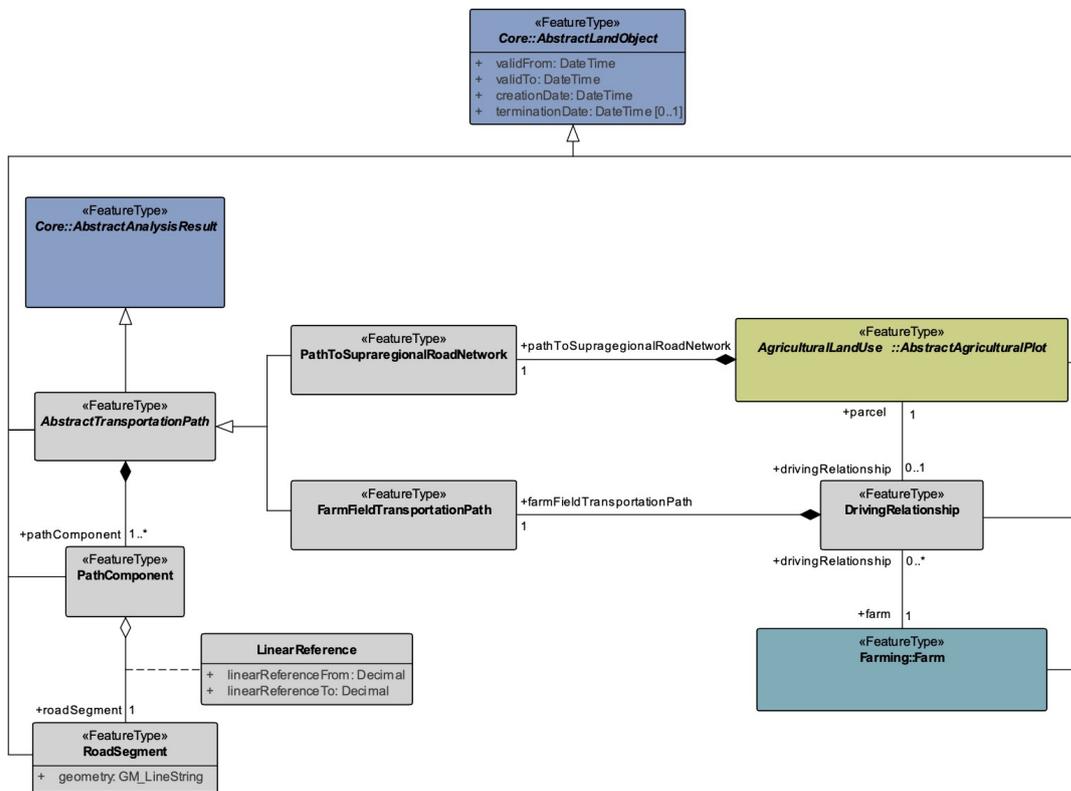


Abbildung 83: UML-Klassendiagramm des Pakets *AgriculturalTransportation*

Transportpfade (abstrakte Klasse *AbstractTransportationPath*) leiten sich aus der abstrakten Klasse *AbstractAnalysisResult* des *Core*-Moduls ab und setzen sich aus einzelnen Pfadbestandteilen (Klasse *PathComponent*) zusammen, die sich aus linear referenzierten Abschnitten entlang von Segmenten des Verkehrswegenetzes ergeben. Diese Referenzierung ist in Form der Beziehungsklasse *LinearReference* zwischen *PathElement* und *RoadSegment* im Modell abgebildet. Zur Verortung der Pfadbestandteile entlang der linienhaften Wegsegmente verfügt die Beziehungsklasse über Angaben zu Start- und Endposition eines Teilstücks bezogen auf den Ausgangspunkt und relativ zur Länge eines Segments (Attribute *linearReferenceFrom* bzw. *linearReferenceTo*). Beide Klassen leiten sich aus der abstrakten Klasse *AbstractLandObject* des *Core*-Moduls ab. Das Modell sieht neben der Abbildung von Hof-Feld-Transportpfaden auch die Abbildung von Transportpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrswegenetz vor (siehe hierzu Kapitel 9). Diese sind als Klasse *FarmFieldTransportationPath* bzw. *PathToSupraregionalRoadNetwork* modelliert, welche sich jeweils aus *AbstractTransportationPath* ableiten.

Hof-Feld-Transportpfade stehen im Zusammenhang mit den entsprechenden Transportbeziehungen, welche im Modell über die Klasse *DrivingRelationship* abgebildet sind. Die Klasse stellt die Verbindung zwischen den landwirtschaftlichen Parzellen und den jeweils bewirtschaftenden Betrieben her. *DrivingRelationship* leitet sich ebenfalls aus der Basisklasse

se *AbstractLandObject* des LandModell^{TUM} ab. Die Transportpfade zwischen Parzellen und dem überregionalen Verkehrsnetz (Klasse *PathToSupraregionalRoadNetwork*) hängen beziehen sich unmittelbar auf landwirtschaftliche Parzellen.

8.4 Implementierung des Analysewerkzeugs

Die folgenden Abschnitte stellen zunächst die genutzten Datengrundlagen vor, bevor auf die notwendige Aufbereitung der Adressdaten zur Verortung landwirtschaftlicher Betriebe und anschließend auf die Implementierung des Werkzeugs zur Abschätzung der Transportpfade eingegangen wird.

8.4.1 Verwendete Datengrundlagen

Als wesentliche Datengrundlagen für die Ableitung landwirtschaftlicher Hof-Feld-Transportpfade dienen neben Daten des InVeKoS (Abschnitt 5.4.1) insbesondere die vom LDBV bereitgestellten amtlichen Hauskoordinaten (Abschnitt 5.4.3) sowie die Geodaten zum Verkehrswegenetz des ATKIS[®] (Abschnitt 5.4.2). Letztere umfassen insbesondere die Objektarten *AX_Strassenachse* (Kennung 42003), *AX_Fahrbahnachse* (Kennung 42005), *AX_Fahrwegachse* (Kennung 42008) sowie Elemente der Objektart *AX_WegPfad-Steig* (Kennung 53003). Aufgrund identischer Start- und Endkoordinaten einzelner Wegsegmente verfügen die Datensätze des Verkehrswegenetzes über eine implizite Netztopologie.

Die Daten des InVeKoS geben neben der Lage landwirtschaftlicher Parzellen zudem Aufschluss über die Adressdaten der jeweils bewirtschaftenden Betriebe. Anhand der Adressdaten lassen sich die Betriebe verorten.

8.4.2 Geokodierung der Betriebsstandorte

Zur Verortung der landwirtschaftlichen Betriebe in Bayern wird vom BayStMELF für das Projekt LandModell^{TUM} ein anonymisierter Datensatz der im Kontext des InVeKoS erhobenen Daten zur Anschrift landwirtschaftlicher Betriebe (genauer der Antragsteller von Mehrfachanträgen) zur Verfügung gestellt. Der Datensatz enthält keinerlei personenbezogene Informationen und verfügt lediglich über Angaben zur Anschrift (Straßenname mit Hausnummer, Postleitzahl, Ortsname und ggf. Ortsteil) sowie über die Möglichkeit zur Verknüpfung mit landwirtschaftlichen Parzellen über einen Schlüsselverweis (= pseudonymisierte Betriebsnummer). Für das Jahr 2018 umfasst der Datensatz gut 115 000 Einträge.

Die einzelnen Bestandteile der Anschrift sind im Datensatz als Felder abgebildet. Während die Angaben zu Postleitzahl, Ortsname sowie zur möglicherweise vorhandenen Bezeichnung des Ortsteils als jeweils einzelne Spalten des Datensatzes abgebildet sind, entsprechen Straßenname, Hausnummer und ggf. vorhandene Hausnummernergänzungen nicht der ersten Normalform, da die einzelnen Bestandteile als zusammenhängende Zeichenkette vorliegen. Die Geocodierung erfordert daher zunächst eine Aufspaltung des betreffenden Feldes in die einzelnen Komponenten Straßenname, Hausnummer sowie möglicherweise vorhandene Hausnummernergänzungen.

Die Aufbereitung der Adressdaten des BayStMELF sowie die darauf aufbauende Geocodierung erfolgt mit Hilfe eines eigens entwickelten FME-Workspaces in Kombination mit einem PostgreSQL-Datenbanksystem zur Vorhaltung der amtlichen Hauskoordinaten. Der FME-Workspace untergliedert sich im Wesentlichen in die Komponenten *Aufbereitung der Adressdaten* und *Geocodierung*, welche in den folgenden Abschnitten detaillierter beleuchtet werden.

8.4.2.1 Aufbereitung der Adressdaten

Zur Aufspaltung der Zeichenkette mit Angaben zu Straßennamen, Hausnummer und Hausnummerergänzung in einzelne Komponenten erfolgt in einem mehrstufigen Extraktionsprozess mit Hilfe von regulären Ausdrücken. Abbildung 84 vermittelt einen Eindruck möglicher und daher bei der Normalisierung zu berücksichtigender Kombinationen bzw. Anordnungen von Straßenbezeichnung, Hausnummer und optionalen Hausnummerergänzungen.

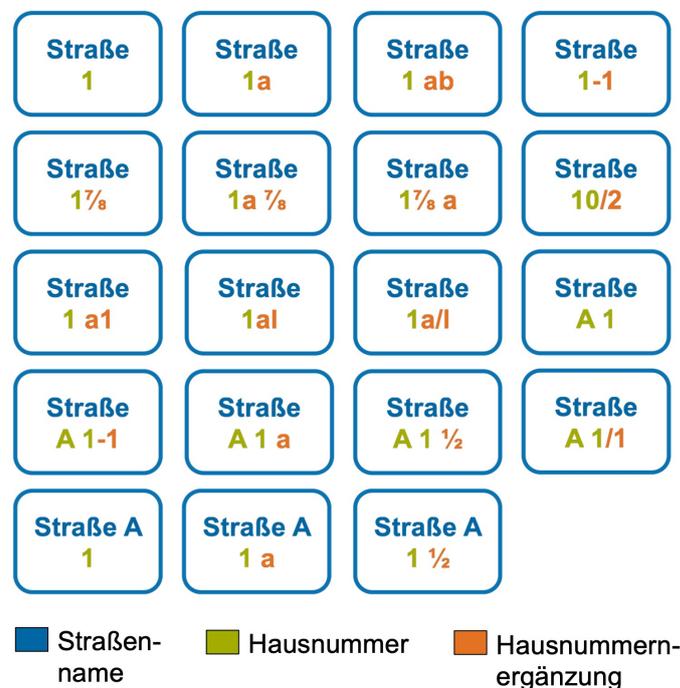


Abbildung 84: Übersicht möglicher Kombinationen aus Straßennamen, Hausnummer und Hausnummerergänzungen in den Adressdaten des InVeKoS

Grundlegend wird bei der Extraktion der einzelnen Adressbestandteile davon ausgegangen, dass die Einträge des betreffenden Feldes im Aufbau der Struktur *<Straßennamen><optionale Hausnummerergänzung><Hausnummer><optionale Hausnummerergänzungen>* entsprechen. Dieser Annahme folgend wird eine zusammenhängende Zeichenkette am Anfang eines Eintrags bestehend aus mindestens zwei Zeichen, die nicht einer Ziffer entsprechen, als potentieller Straßennamen extrahiert und für die spätere Geocodierung zwischengespeichert. Endet eine solche Zeichenkette mit einem Leerzeichen gefolgt von einem Einzelbuchstaben, so wird dieses letzte Zeichen – sofern es sich dabei um einen Buchstaben handelt zwischengespeichert und in der späteren Geocodierung als möglicher Bestandteil des Straßennamens oder alternativ als Bestandteil der Hausnummer interpretiert.

Entsprechend der getroffenen Annahme zum Aufbau des Anschriftenfeldes wird als Hausnummer die der als Straßennamen interpretierten Zeichenkette folgende Sequenz von Ziffern extrahiert und zwischengespeichert. Abschließend sind noch optional nachgestellte Hausnummerergänzungen abzuspalten. Als Hausnummerzusatz gilt dabei eine der als Hausnummer interpretierten Ziffern folgende Zeichenkette, welche sich aus Ziffern, Schrägstrich, Gedankenstrich, Leerzeichen und einer optionalen Sequenz maximal zweier Buchstaben zusammensetzt. Optional vorhandene Hausnummerzusätze werden für die nachfolgende Geocodierung zwischengespeichert.

Zur Vorbereitung auf die nun folgende Geocodierung werden die extrahierten Einzelbestandteile in einem letzten Schritt der Datenbereinigung noch von doppelten bzw. einer Zeichenkette vorangehenden oder nachfolgenden Leerzeichen bereinigt.

8.4.2.2 Verortung der Betriebsadressen

Die Geokodierung der Betriebsadressen erfolgt auf Grundlage des bereits in Abschnitt 5.4.3 vorgestellten Datensatzes *Amtliche Hauskoordinaten* des LDBV. Um einen performanteren Zugriff auf die Einträge des Datensatzes sicherzustellen, wird dieser in eine Tabelle eines PostgreSQL Datenbanksystems überführt.

Zur Verortung der Betriebsadressen werden nun für jeden Eintrag des Datensatzes Anfragen gegen die Datenbank gestellt. Findet sich bei einem exakten Vergleich der Attribute zu Postleitzahl, Straßename, Hausnummer und Hausnummernzusatz keine Entsprechung in den amtlichen Hauskoordinaten, so folgt im weiteren Verlauf ein Musterabgleich des Straßennamens. Dieser Schritt ist erforderlich, da sich die Schreibweisen von Straßennamen in beiden Datensätzen beispielsweise aufgrund von Abkürzungen oder unterschiedlichen Schreibweisen unterscheiden können. Für den Musterabgleich werden die Straßennamen der Betriebsadressen durch Ersetzung von darin auftauchenden Mustern in reguläre Ausdrücke überführt und diese dann gemeinsam mit Postleitzahl, Hausnummer und Hausnummernergänzung als Abfrage gegen die Datenbank mit den amtlichen Hauskoordinaten gestellt. Zunächst werden mit Hilfe von regulären Ausdrücken Muster in den Straßennamen der Betriebsadressen, welche auf Abkürzungen hindeuten (beispielsweise „.“ oder „“) durch den Ausdruck „.“ ersetzt. Darüber hinaus findet schrittweise eine Ersetzung von geläufig als Abkürzung genutzten Zeichenketten wie „Bgm“ für „Bürgermeister“, „Hpt“ für „Haupt“ oder „ hlg.“ für „heiliger“ statt. Für das letztgenannte Beispiel wird zunächst mit Hilfe des regulären Ausdrucks „(^|(?!<=\\W))h(ei)?li?g?e?(r|s|n|m)?“ nach entsprechenden Strukturen gesucht und diese Vorkommen anschließend durch „(h(ei)?li?g?e?(m|r|s|n|n))“ ersetzt. Insgesamt werden diese Weise rund zwanzig typische Abkürzungen durch entsprechende reguläre Ausdrücke ersetzt. Zusätzlich werden Umlaute bzw. entsprechende Digraphen extrahiert und jeweils durch mögliche alternative Schreibweisen ersetzt („ä|ae“, „ö|oe“, „ü|ue“ und „(s+|ß|sz)“).

Findet sich auch im Musterabgleich dieser ersten Stufe für eine Betriebsadresse keine Entsprechung in den amtlichen Hauskoordinaten, so folgt eine zweite Stufe des Musterabgleichs, wobei hier zusätzlich zu den in der ersten Stufe durchgeführten Ersetzungen alternative Schreibweisen ähnlich klingender Muster durch entsprechend alternative Strukturen ersetzt werden. So werden in dieser zweiten Stufe des Musterabgleichs beispielsweise die Muster „dt“, „tt“, „dd“, „th“, „t“ bzw. „d“ oder aber „ph“, „ff“, „f“ und „v“ durch jeweils alternative Schreibweisen ersetzt. Die in den Beispielen genannten Strukturen folgen dem Muster „(dt|t+h?|d+)“ bzw. „(ph|f+|v)“ und werden jeweils dadurch ersetzt. Dabei werden rund fünf-

zehn Muster durch jeweilige Alternativen ersetzt und anschließend wiederum als Anfrage gegen die Datenbank gestellt.

Jeder geocodierte Eintrag des Datensatzes zu Betriebsadressen erhält neben den Attributen der amtlichen Hauskoordinaten eine Reihe von Metadaten zur Suche, über welche ein entsprechender Eintrag in den amtlichen Hauskoordinaten gefunden werden kann sowie zu den vorgenommenen Ersetzungen beim Musterabgleich. Da in Einzelfällen die Anschrift (beispielsweise bei gleicher Kombination aus Straßennamen, Hausnummern und Hausnummersätzen im gleichen Postleitzahlenbereich) wie auch der Mustervergleich zu mehreren Treffern in den amtlichen Hauskoordinaten führen kann, folgt im weiteren Verlauf des Workspaces eine Prüfung auf eindeutige Zuordenbarkeit einer Anschrift zu einer Adressposition. Existieren für eine Betriebsadresse mehrere so folgt im Workspace ein mehrstufiger Selektionsprozess mit iterativer Prüfung der eindeutigen Zuordenbarkeit. So werden beispielsweise Angaben zu Ortsteilen, Ortsnamen der Treffer gegeneinander abgeglichen.

Als Ergebnis des Geocodierungsprozesses können für das Jahr 2018 mehr als 105 000 der 107 000 Adressen mit Hilfe des hier beschriebenen Ansatzes verortet werden.

8.4.3 Abbildung von Präferenzen für einzelne Wegekategorien

Zur Artikulation ungleicher Präferenzen des landwirtschaftlichen Transportverkehrs für verschiedene Wegekategorien sind Gewichtungsfaktoren einzuführen, welche bei der Pfadabschätzung die Bevorzugung bzw. die Meidung einzelner Wegekategorien gegenüber Alternativen zum Ausdruck bringen sollen. Die Kosten für das Passieren eines Netzwerksegments ergeben sich dann aus der Länge der Netzwerkkante und einem für die jeweilige Wegekategorie spezifischen Gewichtungsfaktor.

Für die Abschätzung landwirtschaftlicher Transportpfade werden die Präferenzen für verschiedene Wegekategorien über angenommene Fahrgeschwindigkeiten zum Ausdruck gebracht, woraus sich wiederum ein Gewichtungsfaktor in Form der benötigten Fahrzeit je Längeneinheit ableiten lässt. Die Kosten für das Passieren eines Wegsegments ergeben sich aus dem Produkt der Segmentlänge und dem Gewichtungsfaktor und sind damit äquivalent zur angenommenen Fahrzeit für die Benutzung eines Wegsegments. Damit entspricht die im Rahmen der Pfadabschätzung zu minimierende Kostensumme der benötigten Fahrzeit zwischen Ausgangs- und Zielposition. Abbildung 85 zeigt die angenommenen Fahrgeschwindigkeiten für unterschiedliche Wegekategorien und verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Präferenzen, angenommenen Fahrgeschwindigkeiten und Kantengewichtungsfaktoren. Die Information zu Wegekategorien sowie zu inner- und außerörtlichem Segmentverlauf entstammen den Angaben des ATKIS®.

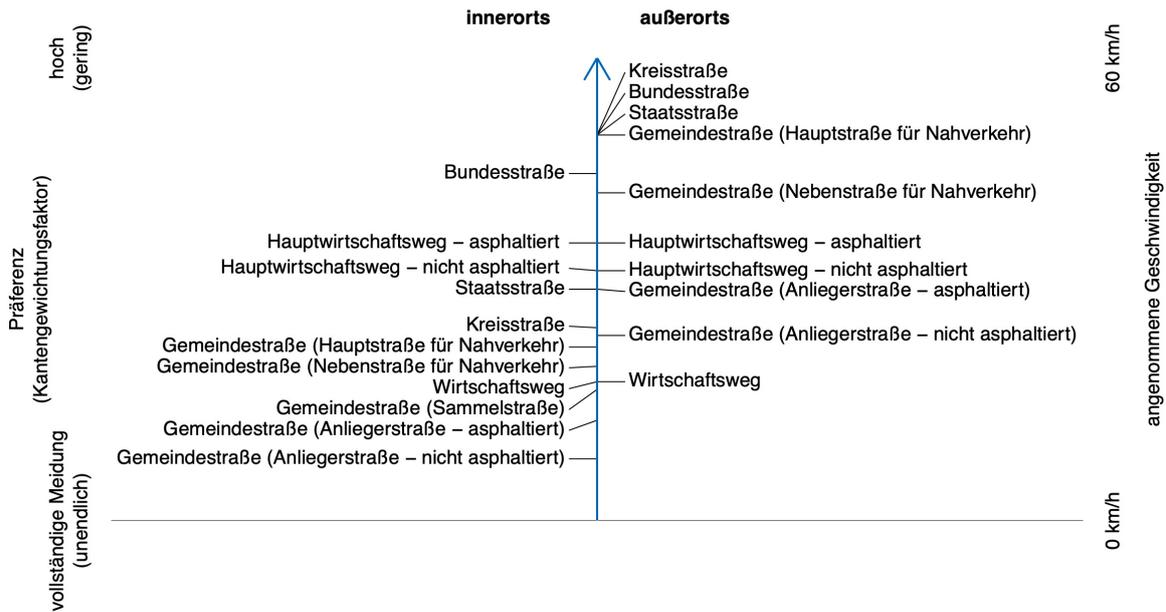


Abbildung 85: Präferenzen, Gewichtungsfaktoren und angenommene Geschwindigkeiten für verschiedene Wegekategorien; Widmung, Wegekategorie sowie Informationen zu inner- bzw. außerörtlichem Verlauf der Wegsegmente entstammen den Angaben lt. ATKIS[®] (Machl et al. 2018)

8.4.4 Werkzeug zur Abschätzung landwirtschaftlicher Transportpfade

Das Werkzeug zur Berechnung der Hof-Feld-Transportpfade wird in Form eines FME-Workspace realisiert. Dieser untergliedert sich in insgesamt acht Abschnitte:

1. Einlesen der benötigten Objekte aus dem Informationssystem
2. Zuweisung der wegekategorie-spezifischen Präferenzen/Kantengewichtungsfaktoren an einzelne Segmente und Berechnung der Kosten
3. Suche nach potentiellen Ausgangs- und Zielpositionen entlang von Wegsegmenten im Umfeld landwirtschaftlicher Betriebe und Parzellen
4. Ermittlung der Pfadkosten zwischen Ausgangspositionen und tatsächlichen Knoten des Wegenetzes
5. Pfadberechnung zwischen infrage kommenden, tatsächlichen Ausgangs- und Zielknoten des Wegenetzes
6. Zusammenführung der Kosten zwischen Ausgangspositionen und den tatsächlichen Knoten mit den Pfadkosten zwischen tatsächlichen Knoten
7. Selektion des Pfades mit geringsten Gesamtkosten zwischen Start- und Zielposition
8. Ausgabe der Pfadb Bestandteile und Speicherung der Ergebnisse in Form von Verweisen auf die beteiligten Einzelobjekte

Zunächst erfolgt das Einlesen der für die Berechnung der Pfade erforderlichen Daten. Als Eingangsdaten benötigt dieser Workspace einerseits die bestehenden Fahrbeziehungen sowie andererseits ein geometrisches Liniennetzwerk des für den landwirtschaftlichen Ver-

kehr nutzbaren Wegesystems. Die Fahrbeziehungen zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und den Hofstellen werden dem Workspace in Form von Tupeln bestehend aus der Parzelle geometrie, der Geometrie einer Hofstelle sowie den Identifikatoren der Hofstelle und der jeweiligen Parzelle übergeben. Diese Tupel sind das Ergebnis einer stichtagsbezogenen Verknüpfung der landwirtschaftlichen Betriebe mit den zugehörigen Parzellen innerhalb des Informationssystems.

Das geometrische Liniennetzwerk des Wegesystems bildet die zweite wesentliche Grundlage der Pfadabschätzung. Die einzelnen Wegsegmente verfügen dabei durch identische Start- bzw. Endkoordinaten über eine implizite Netztopologie. Dadurch ist es im weiteren Verlauf des Analyseprozesses möglich, das Wegenetz durch Ableitung von Inzidenz- und Adjazenzbeziehungen in einen Graphen bestehend aus Knoten und Kanten zu überführen und für ein Routing einzusetzen.

Auf Grundlage der den einzelnen Wegsegmenten zugeordneten Eigenschaften werden diesen wegekategorie-spezifische Präferenzen in Form von angenommenen Fahrgeschwindigkeiten zugeordnet (siehe Abschnitt 8.4.3). Nach Zuweisung der angenommenen Fahrgeschwindigkeiten an die Wegsegmente lassen sich anschließend die Kosten für die Nutzung einzelner Wegsegmente ermitteln. Diese Kosten entsprechen dabei der aus der Länge eines Wegesegments und der angenommenen Fahrgeschwindigkeit ableitbaren Fahrzeit für die Benutzung eines Segments.

Im nächsten Schritt erfolgt die Suche nach potentiellen Ausgangspositionen einer Pfadberechnung entlang von Segmenten des Verkehrswegenetzes im Umfeld landwirtschaftlicher Parzellen und Hofstellen. Hierfür werden über nutzerdefinierbare Parameter maximal zulässige Distanzen zwischen Parzellen bzw. Hofstellen und potentiellen Startsegmenten festgelegt und dem Workspace übergeben. Um verschiedenen topographischen Konstellationen Rechnung zu tragen und insbesondere für landwirtschaftliche Parzellen eine größere Auswahl möglicher Ausgangspositionen zu erhalten, werden die äußeren Polygonumringe der Parzellenpolygone in Einzelsegmente aufgespalten und für jeden Linienzug potentielle Ausgangssegmente der Pfadabschätzung gesucht. Als mögliche Ausgangspunkte gelten die entlang eines Wegsegments der Parzelle bzw. der Hofstelle nächstgelegenen Positionen. Für jede Ausgangsposition lassen sich nun aus der relativen Position bezogen auf den jeweiligen Start- bzw. Endpunkt die Pfadkosten bis zum Erreichen eines tatsächlichen Knoten des Verkehrswegenetzes (= Start- und Endpunkt des Segments) anteilig an den Gesamtkosten des Segments berechnen. Aus der Vielzahl der für jede Parzelle bzw. Hofstelle infrage kommenden Ausgangspositionen lassen sich nun für jede Kombination aus Parzelle, Hofstelle und möglichem Ausgangssegment diejenigen Ausgangspositionen selektieren, welche die minimalen Pfadkosten zu einem tatsächlichen Knoten des Verkehrswegenetzes aufweisen. Für die jeweiligen Ausgangspositionen werden diese Kosten bis zum Erreichen eines tatsächlichen Knoten des geometrischen Liniennetzwerkes gespeichert.

Nachdem nun für jede Fahrbeziehung mögliche Start- und Zielknoten (= tatsächliche Knoten des Netzwerks) bekannt sind, kann in einem nächsten Schritt die Pfadberechnung unter Minimierung der Kostensumme vorgenommen werden. Die Software FME stellt hierfür einen eigenen Transformer namens *ShortestPathFinder* bereit. Diesem Transformer sind einerseits das geometrische Liniennetzwerk samt Kosten für einzelne Segmente sowie andererseits Ausgangs- und Endposition des zu berechnenden Pfades in Form von A-B-Linien zu übergeben. Diese A-B-Linien werden aus der Lage der zuvor ermittelten Ausgangs- und Zielknoten erzeugt. Zur Reduzierung der Anzahl zu berechnender Pfade werden die A-B-Linien mit identischen Ausgangs- und Zielpositionen zusammengefasst und die im weiteren Verlauf nötigen Angaben zu Parzelle, Hofstelle sowie zu Ausgangs- und Zielposition für die

jeweilige A-B-Pfadbeziehung als Listenattribute zwischengespeichert. Innerhalb des FME-Transformers zur Pfadberechnung erfolgt nun eine Überführung des geometrischen Liniennetzwerks in eine Graphstruktur sowie auch die Berechnung der kostenminimalen Pfade zwischen den übergebenen Start- und Zielpositionen mit Hilfe des Algorithmus nach Dijkstra (1959). Zur Beschleunigung des Analyseprozesses erfolgt die Pfadberechnung in bis zu 16 parallelen Prozessen.

Für jede Hof-Feld-Fahrbeziehung lässt sich nun in einem nächsten Schritt nach Zusammenführung der Pfadkosten zwischen tatsächlichen Knoten mit den Kosten zwischen tatsächlichen Knoten und den Ausgangspositionen entlang infrage kommender Start- bzw. Zielsegmente der Pfad mit den geringsten Gesamtkosten selektieren. Die einzelnen Pfadbestandteile werden in Form von Verweisen auf die betreffenden Objekte ausgegeben und entsprechend im Informationssystem gespeichert. Dabei ermöglicht die kleinteilige Abbildung der Pfade große Vielfalt weiterführender Analysen, die beispielhaft in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden sollen.

8.5 Ergebnisse

Der hier beschriebene Ansatz eröffnet erstmals die Möglichkeit, eine tiefgreifende, detaillierte und landesweit flächendeckende Analyse bestehender Hof-Feld-Transportpfade durchzuführen. Zunächst sollen in diesem Abschnitt Aussagen zu den Anteilen ermittelter Transportpfade an der Gesamtanzahl aller Hof-Feld-Transportbeziehungen getroffen werden. Die kleinteilige Abbildung der Pfade erlaubt eine große Vielzahl realisierbarer Analysen. Exemplarisch hierfür werden in den anschließenden Kapiteln die Ergebnisse zu einzelparzellenbezogenen Analysen vorgestellt. Die für Einzelparzellen vorliegenden Informationen werden anschließend aggregiert und für die Ableitung bayernweiter Kennzahlen zu Transportentfernungen in der Landwirtschaft herangezogen. Dabei werden auch regionale Unterschiede beleuchtet. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der benötigten Rechenzeiten.

8.5.1 Anteil der Parzellen mit ermittelten Hof-Feld-Pfaden

Zum Stichtag 01.06.2018 lassen sich für mehr als 97,3 % der Acker- bzw. 96,1 % Grünlandparzellen Hof-Feld-Transportpfaden ableiten. Lediglich für 2,3 % der Hof-Feld-Transportbeziehungen zu Acker- bzw. 2,2 % Grünlandparzellen kann aufgrund fehlender Positionsangaben zum Betriebssitz keine Routenabschätzung durchgeführt werden. Ursache dafür sind einerseits fehlerhafte oder unvollständige Angaben zur Anschrift landwirtschaftlicher Betriebe sowie andererseits auch fehlende Einträge in den amtlichen Hauskoordinaten bzw. landwirtschaftliche Betriebe außerhalb Bayerns. Für weitere 0,4 % der Acker- bzw. 1,7 % der Grünlandparzellen kann mangels infrage kommender Wegsegmente im Bereich der Parzellen keine Pfadberechnung erfolgen.

Die Abbildungen 86 und 87 zeigen die regionalen Anteile der Acker- bzw. Grünlandparzellen, für welche zum Stichtag 01.06.2018 ein geschätzter Hof-Feld-Transportpfad vorliegt. Dieser Anteil ergibt sich als Quotient aus der Anzahl landwirtschaftlicher Parzellen mit ermitteltem Hof-Feld-Pfad und der Gesamtanzahl landwirtschaftlicher Parzellen je Aggregationseinheit (hier 10 km x 10 km). Die Zuordnung der Parzellen zu den räumlichen Aggregationseinheiten erfolgt über den Schwerpunkt der jeweiligen Geometrie.

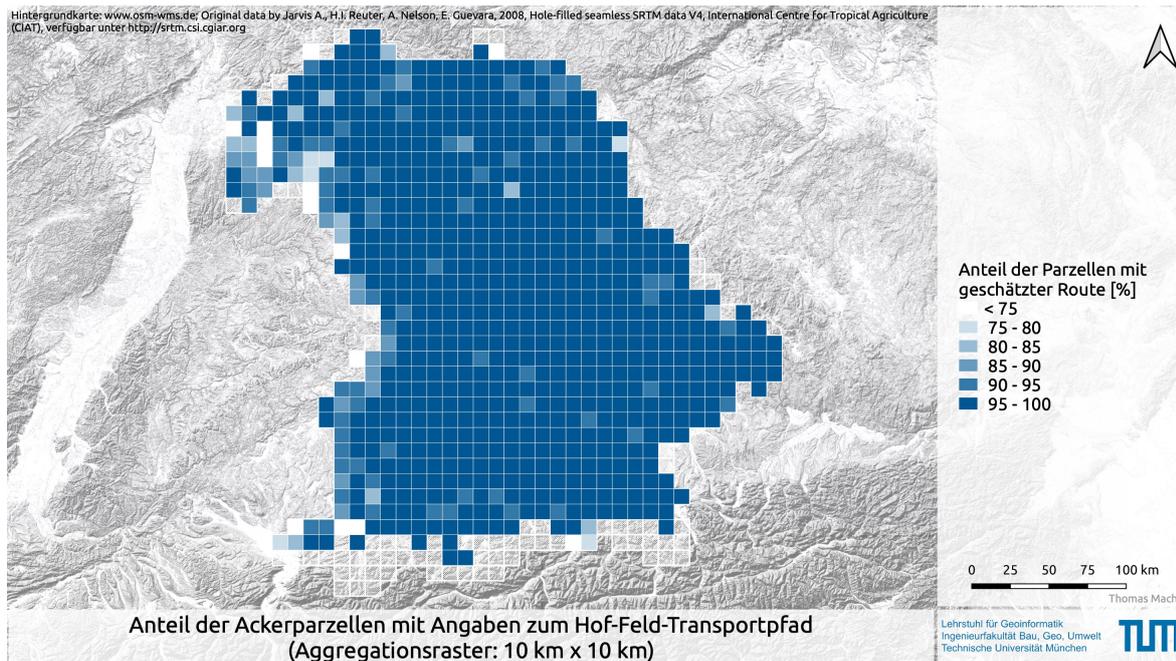


Abbildung 86: Anteil der Ackerflächen mit ermitteltem Hof-Feld-Transportpfad aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

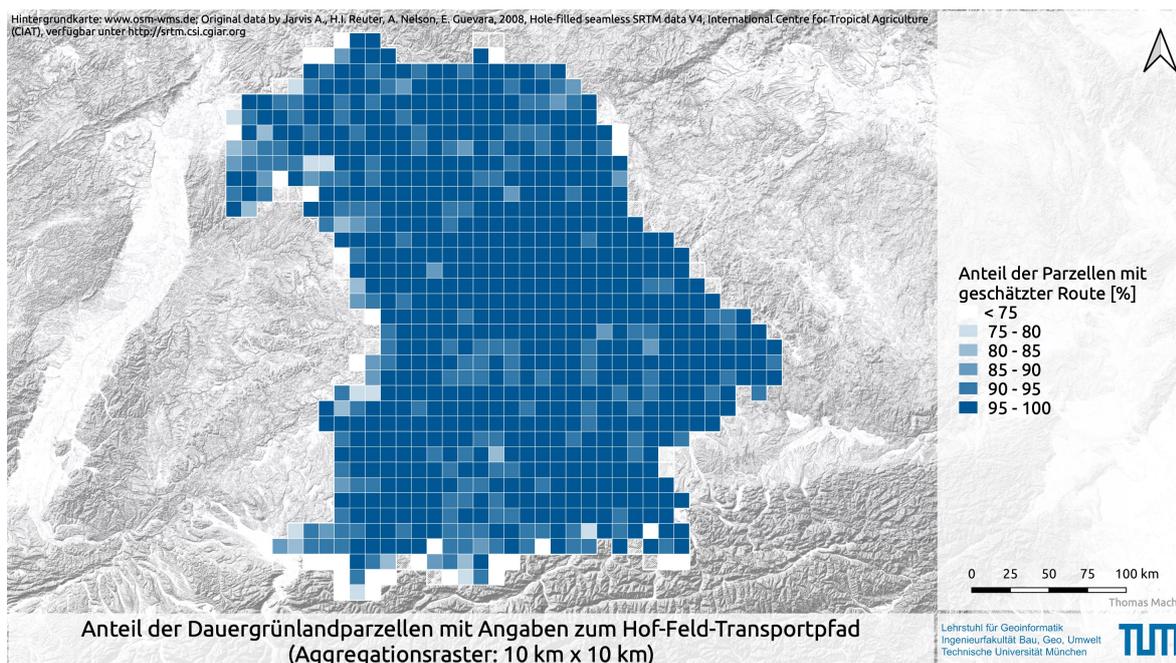


Abbildung 87: Anteil der Grünlandflächen mit ermitteltem Hof-Feld-Transportpfad aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, ermöglicht der im LandModell^{TUM} entwickelte Ansatz flächendeckend eine Abschätzung von Hof-Feld-Transportpfaden für deutlich mehr als 95 % der Acker- bzw. Grünlandparzellen. Geringe Einschränkungen hinsichtlich des Anteils von Parzellen mit Angaben zu Hof-Feld-Transportpfaden ergeben sich lediglich in den Bereichen zu angrenzenden Ländern und Bundesländern. Ursächlich hierfür dürfte insbesondere die Bewirtschaftung von Parzellen durch Landwirte sein, deren Betriebsitze sich außerhalb Bayerns befinden. Für Grünlandparzellen zeigen sich zusätzlich im Alpenraum

einige Bereiche, für die der Anteil von Parzellen mit Angaben zu Transportpfaden unterhalb von 50 % liegt. In diesen Bereichen sind Parzellen zumeist nicht an bestehende und für landwirtschaftliche Fahrzeuge nutzbare Wege angeschlossen.

8.5.2 Transportdistanz und Zusammensetzung für Einzelpfade

Aufgrund der kleinteiligen Abbildung von Pfaden in Form von Verweisen auf die beteiligten Objekte besteht vollständiger Zugriff auf sämtliche Informationen zu den jeweils zugehörigen Komponenten. Durch Aggregation der einzelnen Bestandteile eines Hof-Feld-Transportpfades lassen sich neben der Geometrie auch Angaben zur Länge sowie zur Zusammensetzung der Pfade ableiten. Innerhalb des Informationssystems ist die Ausgabe der Geometrie, der Länge und der Zusammensetzung von Pfaden als Datenbanksicht implementiert, deren Erzeugung in SQL-Ausdruck 12 dargestellt ist. Aus Gründen der Vereinfachung sind im gezeigten SQL-Ausdruck zeitliche Aspekte sowie auch Bezeichnungen der Datenbankschemata nicht dargestellt.

Zur Ableitung der Pfadb Bestandteile sind zunächst die Pfadb Bestandteile (Tabelle *PathComponent*), welche in Form von Verweisen auf Segmente des Wegenetzes vorliegen, mit den Segmenten des Verkehrswegenetzes (Tabelle *RoadSegment*) über einen Fremdschlüsselverweis zusammenzuführen (Zeilen 40 bis 42). Anschließend lassen sich mit Hilfe der PostGIS-Funktion `st_linesubstring()` Teilstücke der linienhaften Straßensegmente extrahieren (Zeilen 23 bis 36). Dieser Funktion ist einerseits die Geometrie des Wegsegments (Zeile 23) sowie andererseits die Ausgangs- (Zeilen 24 bis 29) und Endposition (30 bis 35) relativ zum Start- bzw. Endpunkt und bezogen auf die Segmentlänge zu übergeben. Diese Angaben sind in den Attributen *linearReferenceFrom* und *linearReferenceTo* der Tabelle *PathComponent* enthalten. Da die Funktion voraussetzt, dass die Ausgangsposition in Zeichenrichtung des Liniensegments vor der Endposition des aus dem Linienzug zu extrahierenden Teilstücks liegt, ist eine entsprechende Fallunterscheidung (Zeilen 24 bis 29 bzw. 30 bis 35) durchzuführen. Eine entsprechende Verletzung der Eingangsbedingung für die Funktion könnte beispielsweise dann auftreten, wenn innerhalb eines Hof-Feld-Transportpfades ein Segment entgegen der Zeichenrichtung genutzt wird.

Durch Aggregation der Pfadb Bestandteile nach den Identifikatoren des Betriebs (Attribut *idFarm*) und der Parzelle (Attribut *idParcel*) als gemeinsam eindeutige Identifikatoren der Transportbeziehung sowie nach der Wegekategorie (Attribut *roadCategory*) lassen sich die Bestandteile des Pfades gruppiert nach Art der Verkehrswege angeben (Zeilen 14 bis 45). Dabei werden die Gesamtlänge der verschiedenen Wegekategorien berechnet (Zeile 14 und 15) und die Pfadb Bestandteile über die PostGIS-Funktion `st_collect()` zu Multilinienzügen zusammengeführt (Zeilen 16 und 17).

Abschließend werden die Pfadb Bestandteile durch eine weitere Aggregationsstufe in ein Ergebnistupel je Transportbeziehung zusammengeführt. Dazu sind die Pfadb Bestandteile über die Parzellen- und Betriebsidentifikatoren zusammenzuführen. Für jeden Transportpfad werden dessen Bestandteile in Form eines komplexen Datentyps in einem Array abgelegt (Zeilen 3 bis 5). Dieser Schritt erfolgt mit Hilfe der Aggregationsfunktion `array_agg()`. Der komplexe Datentyp setzt sich aus der Längensumme einzelner Wegekategorien und Angaben zur Beschreibung des Wegetyps zusammen. Innerhalb des Arrays werden die Pfadb Bestandteile ihrer Längenanteile am Gesamtpfad absteigend sortiert abgelegt (Zeile 5). Darüber hinaus werden auch die Gesamtlängen der Pfade durch Summenbildung über alle Bestandteile berechnet (Zeilen 7 und 8). Damit enthält die Datenbanksicht neben den Verweisen auf die

Parzelle (Attribut *idParcel*) und die Hofstelle (*idFarm*) auch die Geometrie (Attribut *pathGeometry*), die Gesamtlänge (Attribut *totalPathLength*) des Pfades sowie auch eine kleinteilige Beschreibung der Pfadzusammensetzung (Attribut *pathComposition*).

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "FarmFieldTransporationPath"
2 AS
3   SELECT array_agg((round("lengthPathComponentRoadCategory"),
4                     "roadCategory",
5                     ORDER BY "lengthPathComponentRoadCategory" DESC))
6     AS "pathComposition",
7     sum("lengthPathComponentRoadCategory")
8     AS "totalPathLength",
9     st_collect(geometry)
10    AS "pathGeometry",
11    "idParcel",
12    "idFarm"
13 FROM -- Aggregation der Pfadb Bestandteile gruppiert nach Wegekategorie
14      (SELECT sum(st_length("pathComponentGeometry"))
15            AS "lengthPathComponentRoadCategory",
16            st_collect("pathComponentGeometry")
17            AS geometry,
18            "idParcel",
19            "idFarm",
20            "roadCategory"
21 FROM -- Ausgabe der Pfadb Bestandteile in Form von Teilstücken einzelner
22      -- Segmente des Verkehrsnetzes
23      (SELECT st_linesubstring(rs.geometry,
24                              CASE
25                                WHEN pc."linearReferenceFrom"
26                                     < pc."linearReferenceTo"
27                                THEN pc."linearReferenceFrom"
28                                ELSE pc."linearReferenceTo"
29                                END,
30                              CASE
31                                WHEN pc."linearReferenceTo"
32                                     > pc."linearReferenceFrom"
33                                THEN pc."linearReferenceTo"
34                                ELSE pc."linearReferenceFrom"
35                                END)
36            AS "pathComponentGeometry",
37            pc."idParcel",
38            pc."idFarm",
39            rs."roadCategory"
40 FROM "PathComponent" pc
41 JOIN "RoadSegment" rs
42     ON rs."oid" = pc."idRoadSegment") "PathComponent"
43 GROUP BY "idParcel",
44          "idFarm",
45          "roadCategory") "PathComponentsRoadCategory"
46 GROUP BY "idParcel", "idFarm";

```

Listing 12: SQL-Ausdruck zur Ableitung der Hof-Feld-Transportpfade aus den linearen Referenzen auf Segmente des Verkehrsnetzes (vereinfacht)

Abbildung 88 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Abfrage für eine beispielhaft ausgewählte Parzelle. Entsprechende Angaben sind für sämtliche Parzellen in Bayern verfügbar.

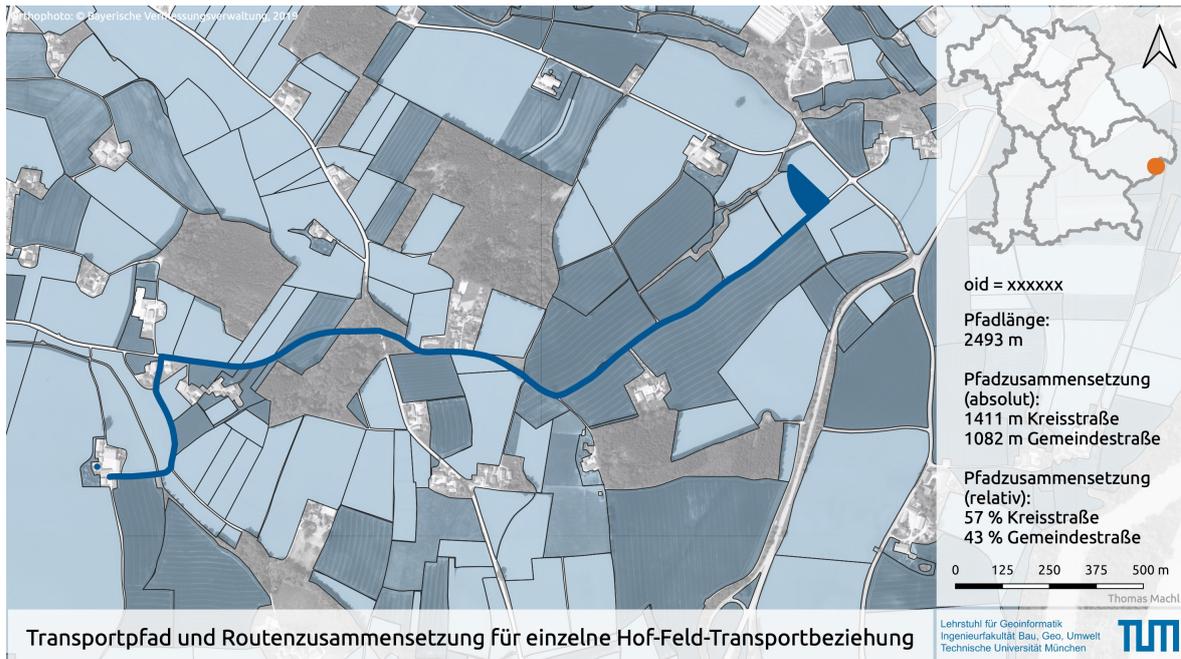


Abbildung 88: Hof-Feld-Transportpfad mit Pfadzusammensetzung für eine einzelne Fahrbeziehung (Stichtag: 01.06.2018)

8.5.3 Landesweite Betrachtungen zu Hof-Feld-Transportentfernungen

Auf Grundlage der Analyseergebnisse lassen sich nun erstmals detaillierte Angaben zu bestehenden Hof-Feld-Transportentfernungen in der Landwirtschaft ableiten, welche eine solide Grundlage für eine umfassende ökonomische wie ökologische Betrachtung des Aspekts Transporte in der Landwirtschaft bilden. Abbildung 89 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion für die Hof-Feld-Transportdistanzen in Bayern zum Stichtag 01.06.2018.

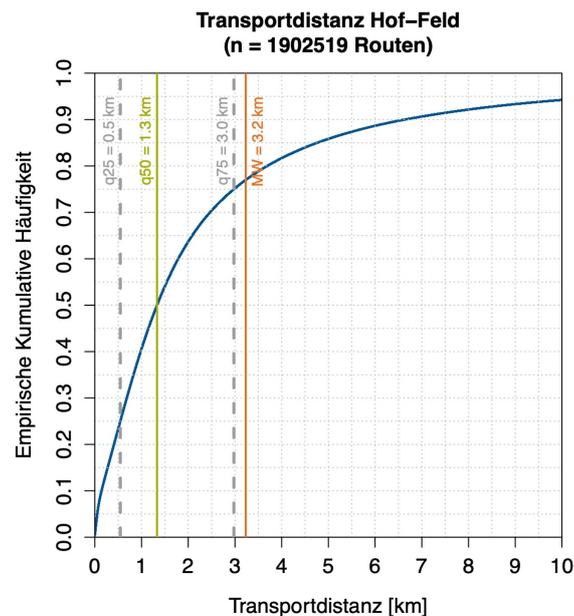


Abbildung 89: Summenhäufigkeitsfunktion der errechneten Hof-Feld-Transportentfernung in Bayern (Stichtag: 01.06.2018)

Die Darstellung zeigt neben dem arithmetischen Mittelwert (MW) auch die Quartile (q_{25} , q_{50} und q_{75}) der geschätzten Hof-Feld Transportdistanzen. Der deutliche Unterschied in der Lage des arithmetischen Mittelwerts und des Medians deutet dabei eine starke rechtschiefe der Verteilung an. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, sind 75 % der Hof-Feld-Transportpfade in Bayern größer als 0,5 km (q_{25}) bzw. kleiner als 3,0 km (q_{75}). Entsprechend ist ein Viertel der geschätzten Transportdistanzen größer als 3,0 km (q_{75}) bzw. kleiner als 0,5 km (q_{25}). Der Median der Transportdistanzen liegt bei einem Wert von 1,3 km (q_{50}). Die Hälfte der in den Untersuchungen betrachteten Distanzen bewegt sich zudem in einem Bereich von 0,5 km (q_{25}) und 3,0 km (q_{75}) bzw. außerhalb dieses Bereichs.

Bedingt durch die Abbildung der Ergebnisse in Form von Verweisen auf die betreffenden Objekte ist es zudem möglich, eine differenzierte Betrachtung der Transportdistanzen für Acker- und Grünlandflächen durchzuführen. Abbildung 90 zeigt die Summenhäufigkeitsdiagramme der geschätzten Transportdistanzen für Acker- (links) und Grünlandflächen (rechts) sowie die jeweiligen Quartile (q_{25} , q_{50} und q_{75}) und die arithmetischen Mittelwerte (MW) als Lagemaße.

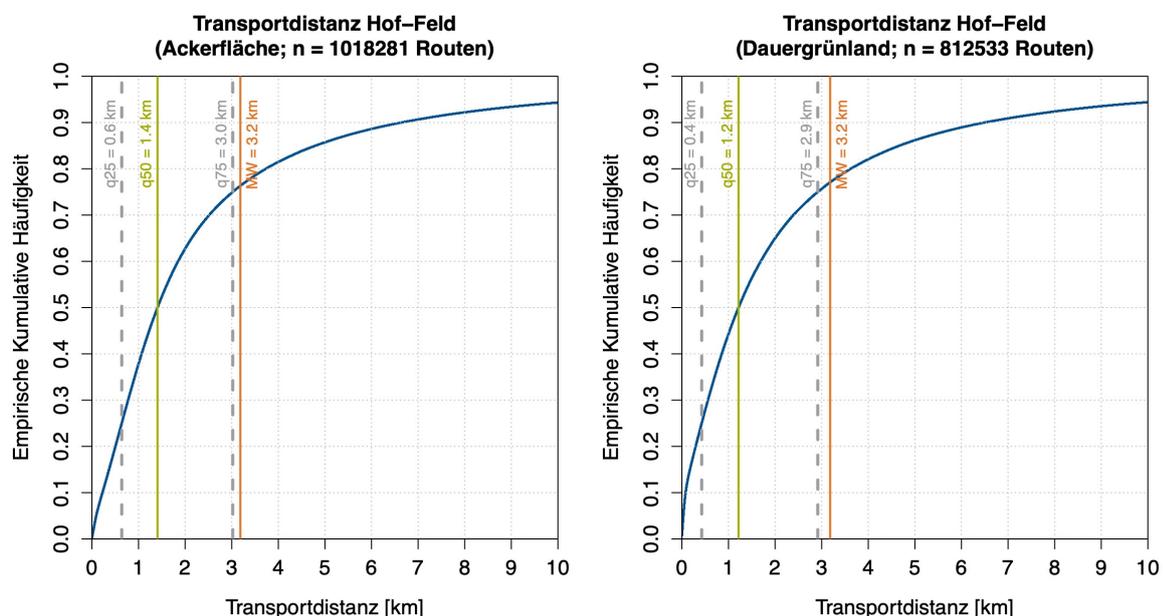


Abbildung 90: Summenhäufigkeitsfunktion der Hof-Feld-Transportentfernung für Acker- (links) und Grünlandflächen (rechts) in Bayern (Stichtag 01.06.2018)

So sind in der landesweiten Betrachtung 75 % der Ackerflächen weniger als 3,0 km (q_{75}) bzw. mehr als 0,6 km (q_{25}) von der jeweiligen Hofstelle entfernt. Damit befinden sich 25 % der Parzellen mit Ackernutzung in einer Transportentfernung von weniger als 0,6 km (q_{25}) bzw. mehr als 3,0 km (q_{75}) von der Hofstelle. 50 % der errechneten Hof-Feld-Transportdistanzen sind für Ackerflächen kleiner bzw. größer als 1,4 km bzw. in einem Bereich von 0,6 km (q_{25}) bis 3,0 km (q_{75}).

Eine ähnliche Verteilung zeigt sich für Grünlandflächen. Hier befinden sich 75 % der Parzellen in einer Fahrdistanz von mehr als 0,4 km (q_{25}) bzw. weniger als 2,9 km (q_{75}) von der Hofstelle entfernt. Die Hälfte der betrachteten Transportdistanzen weisen einen Wert kleiner bzw. größer 1,2 km (q_{50}) auf oder befinden sich in einem Entfernungsbereich von 0,4 km (q_{25}) bis 2,9 km (q_{75}). Damit scheinen Acker- und Grünlandparzellen ähnliche Transportdistanzen aufzuweisen, wenngleich Grünlandparzellen im Vergleich zu Ackerflächen tendenziell etwas arrondierter sind.

Zusätzlich zu einer getrennten Betrachtung von Acker- und Grünlandflächen ermöglicht das Informationssystem aufgrund der einzelobjektbezogenen Speicherung der Analyseergebnisse eine räumlich differenzierte Betrachtung bestehender Hof-Feld-Transportdistanzen. Die Abbildungen 91 und 92 zeigen das 75 %-Quantil der errechneten Transportdistanzen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster.

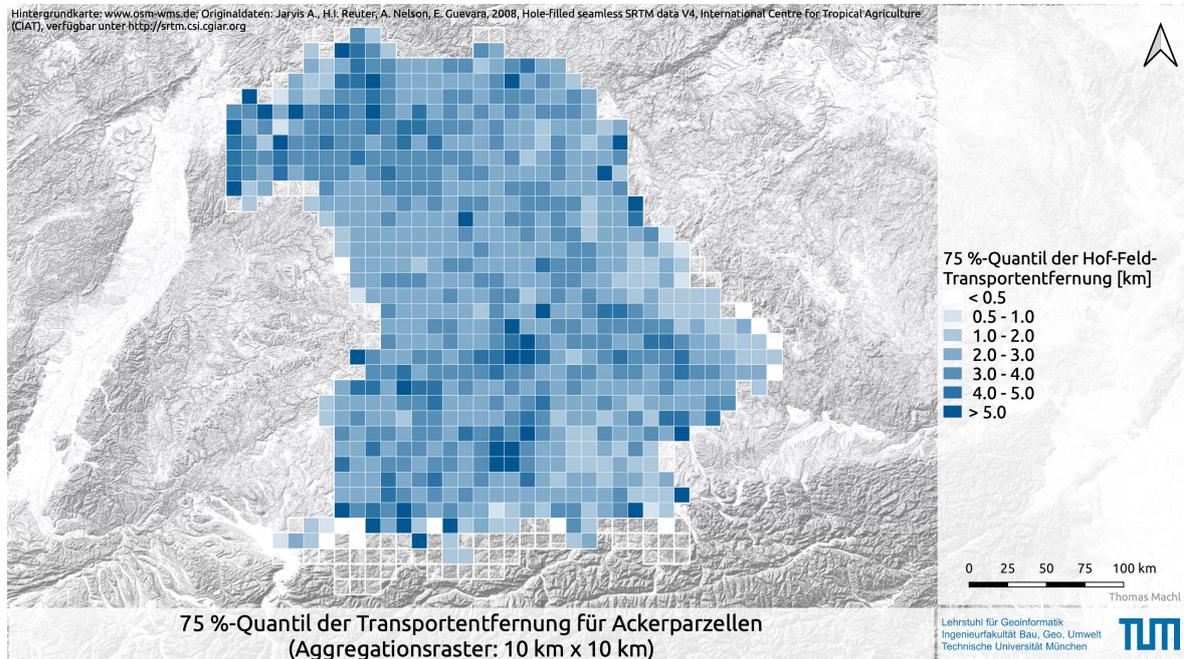


Abbildung 91: 75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

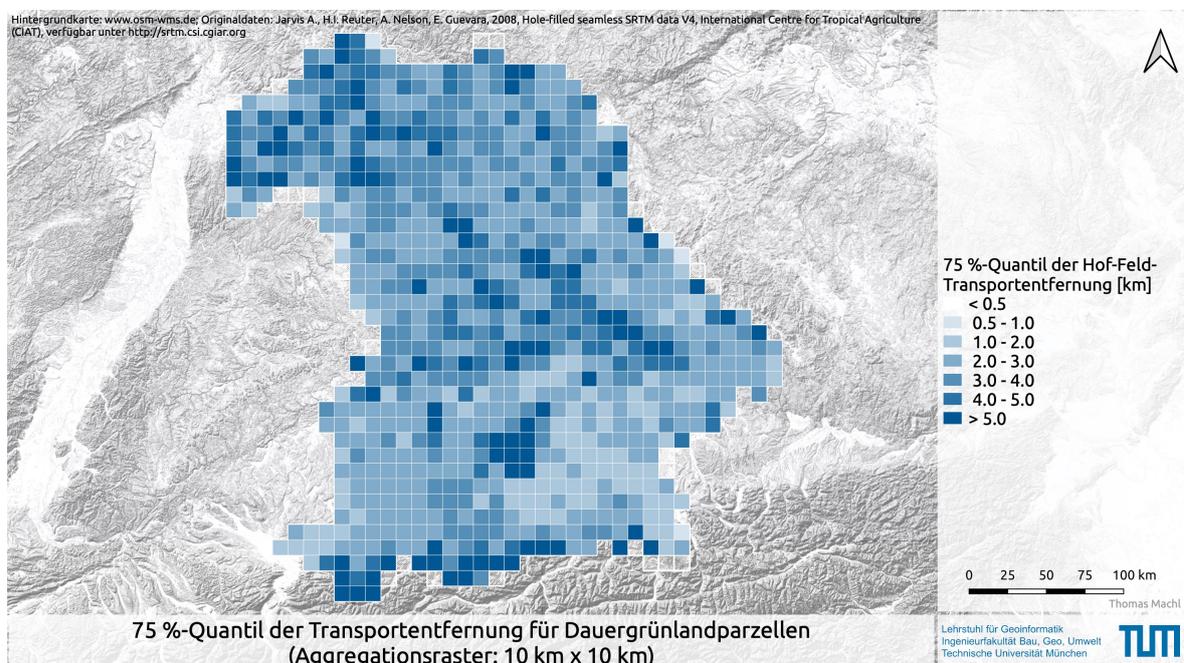


Abbildung 92: 75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

Die einzelnen Parzellen werden dabei über die Lage des jeweiligen Zentroids den räumlichen Aggregationseinheiten zugeordnet. Beide Abbildungen machen regionale Unterschiede

de sichtbar. Da sich die Ergebnisse der Analysen insbesondere als Grundlage für weiterführende Arbeiten verstehen, wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Interpretation der Ergebnisse eingegangen.

8.5.4 Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz

Die folgenden beiden Abschnitte geben einen Überblick der Performanz des entwickelten Ansatzes. Zunächst sollen dabei die benötigten Ausführungszeiten für die Ermittlung der Transportpfade zwischen Parzellen und den Hofstellen betrachtet werden bevor näher auf die beobachteten Rechenzeiten für weiterführende Analysen innerhalb des Informationssystems eingegangen wird.

8.5.4.1 Rechenzeiten für die Ermittlung der Hof-Feld-Transportpfade

Die Laufzeit des FME-Workspaces zur landesweiten Berechnung der Hof-Feld-Transportpfade einschließlich der Selektion potentieller Ausgangs- und Zielpositionen entlang umliegender Straßensegmente im Umfeld der Parzellen beträgt 20 h 11 min. Da für jede der rund 1,7 Mio. Fahrbeziehungen zwischen Hofstellen und Parzellen jeweils mehrere Kombinationen aus möglichen Ausgangs- und Zielpositionen eines möglicherweise kostenminimalen Pfades in Betracht kommen, sind dabei insgesamt mehr als 8,9 Mio. Pfade zu ermitteln und zu prüfen.

8.5.4.2 Performanz der Rekonstruktion von Pfaden innerhalb des Informationssystems

Zur Beurteilung der Performanz beim Zugriff auf die im Datenbanksystem abgebildeten Einzelpfade werden über *pgAdmin* für 30 Fahrbeziehungen die Laufzeiten zur Rekonstruktion der Geometrie und der Zusammensetzung von Einzelpfaden aus den jeweiligen Pfadbestandteilen ermittelt. Im Mittel werden hierzu für Einzelpfade etwa 10 ms je Fahrbeziehung benötigt.

Um auch die Performanz der Rekonstruktion von Geometrie und Pfadzusammensetzung sämtlicher 1,7 Mio. Routen aus den linear referenzierten Pfadkomponenten evaluieren zu können, wird in *pgAdmin* auf Grundlage der im Informationssystem abgebildeten Datenbanksichten eine entsprechende Tabelle erzeugt. Die Laufzeit zur Erzeugung dieser Tabelle beträgt 13 min 33 s.

Im Vorgriff auf die im Abschnitt 10 beschriebene Ermittlung der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente werden an dieser Stelle zur Beurteilung der Performanz des Systems zudem auch die Laufzeiten für die Ermittlung der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente herangezogen. Details zu diesem Aspekt finden sich in Abschnitt 10. Dazu wird für alle 3,2 Mio. Wegsegmente in Bayern auf Grundlage der landesweit 2,0 Mio. Schläge die Fläche der jeweils an ein Straßensegment angebotenen landwirtschaftlichen Nutzfläche differenziert nach Kulturarten ermittelt. Die Laufzeit für die Erzeugung einer entsprechenden Tabelle beträgt 20 min 10 s.

8.6 Evaluierung der Schätzqualität bei der Routenbestimmung

Die Aussagekraft des landesweiten Monitorings sowie auch die Ableitung weiterer Parameter aus den Pfaden - beispielsweise zur über Einzelsegmente erschlossenen landwirtschaftlichen Nutzfläche (siehe Abschnitt 10) - sind unmittelbar von der Qualität der geschätzten Einzelpfade abhängig. Zur Prüfung der Schätzqualität von Einzelpfaden sind daher sowohl die geschätzten Transportdistanzen als auch die Übereinstimmung der geschätzten Transportpfade mit realen Routen zu evaluieren. Dieser Abschnitt erläutert das gewählte Vorgehen zur Validierung der Routenabschätzung und beschreibt die erzielbare Genauigkeit.

8.6.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Quantifizierung der Qualität der geschätzten Routen

Um Aussagen zur Qualität der Routenberechnung treffen zu können, sind die errechneten Pfade mit tatsächlichen Routen zwischen bekannten Ausgangs- und Zielpositionen abzugleichen. Für die Evaluierung lässt sich einerseits die Entfernung und andererseits auch die Übereinstimmung der Routenverläufe heranziehen. Zur Quantifizierung der Übereinstimmung zwischen geschätzten und tatsächlichen Routen dient in dieser Arbeit als Indikator der *Grad der Übereinstimmung* (GDÜ). Dieser beschreibt den relativen Anteil der *Länge übereinstimmender Pfadbestandteile* ($Länge_{\text{Übereinstimmung}}$) bezogen auf *Gesamtlänge eines geschätzten Pfades* ($Länge_{\text{geschätzterPfad}}$) als:

$$GDÜ = \frac{Länge_{\text{Übereinstimmung}}}{Länge_{\text{geschätzterPfad}}} \quad (8.1)$$

Das Prinzip dieses Abgleichs ist in Abbildung 93 veranschaulicht.

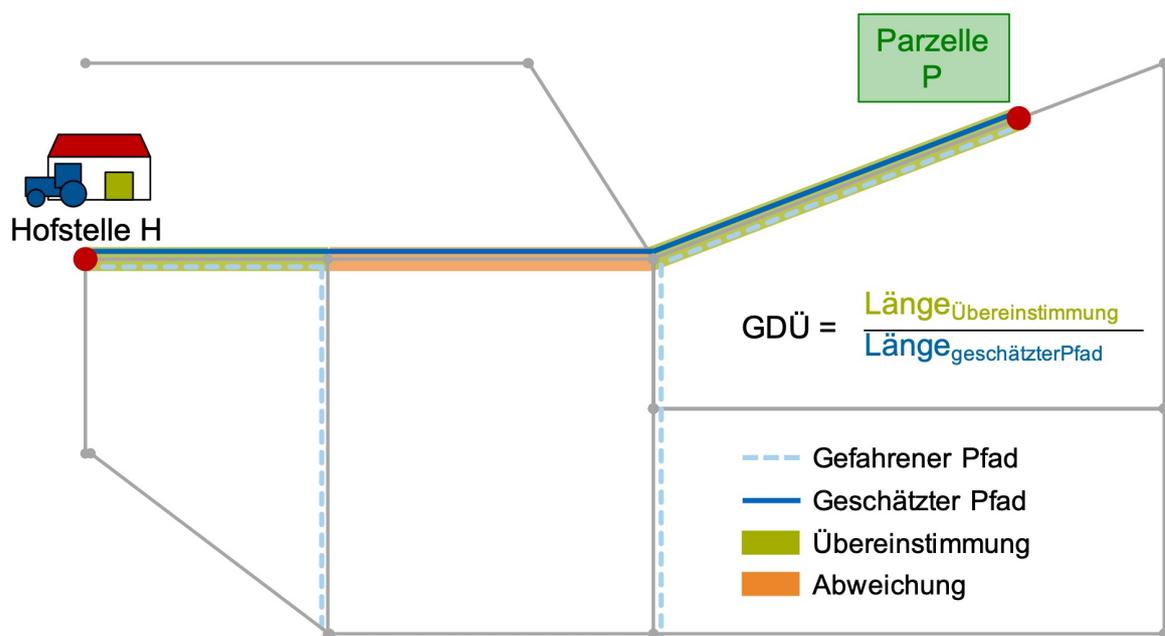


Abbildung 93: Ableitung des Indikators Grad der Übereinstimmung zwischen tatsächlichen und geschätzten Hof-Feld-Transportpfaden (Machl et al. 2018, verändert)

Die Abbildung zeigt in blau den geschätzten Pfadverlauf zwischen den Start- und Zielpositionen. Hellblau gestrichelt ist der tatsächlich von einem Landwirt für die Anfahrt der Parzelle genutzte Pfad dargestellt. In der Darstellung sind zudem die übereinstimmenden Bereiche der Pfade grün und die abweichenden Abschnitte orange hervorgehoben.

8.6.2 Referenzdaten zur Validierung der Schätzqualität

Zur Validierung des entwickelten Berechnungsansatzes und zur Evaluierung der erzielbaren Schätzqualität findet im Rahmen der Untersuchungen von Astner (2017) ein umfassender Abgleich der errechneten Pfade mit tatsächlichen Hof-Feld-Transportrouten statt. Innerhalb der unterfränkischen ILEK-Region NES-Allianz – Details finden sich im Abschnitt 10.5 – werden zu diesem Zweck umfangreiche Daten zu bestehenden Hof-Feld-Transportpfaden erhoben und dabei auch Ursachen für möglicherweise auftretende Abweichungen zwischen geschätzten und tatsächlichen Routen ermittelt und festgehalten. Im Zuge einer persönlichen Befragung von Landwirten vor Ort werden den Befragungsteilnehmern für jede Fahrbeziehung zwischen einer ihrer Parzellen und der Hofstelle jeweils eine Karte des geschätzten Routenverlaufs vorgelegt. Treten dabei Abweichungen zwischen geschätztem und tatsächlichem Anfahrtspfad auf, so werden abweichende Routenverläufe zusammen mit den jeweiligen Ursachen für die spätere Analyse festgehalten.

An der Befragung sind insgesamt 13 landwirtschaftliche Betriebe, jeweils vertreten durch den Betriebsinhaber bzw. Verwalter, sowie auch eine Biogasanlage, vertreten durch den zuständigen Disponenten, beteiligt. Die Betriebsgröße der an der Untersuchung beteiligten Betriebe bewegt sich in einem Bereich zwischen 20 ha und deutlich mehr als 1 000 ha (q_{25} : 78 ha, q_{50} : 122 ha, q_{75} : 181 ha). Mit Ausnahme der Biogasanlage werden für jeden Betrieb sämtliche Routen zu denjenigen Parzellen abgeglichen, deren Fläche in Summe mindestens 80 % der Betriebs- bzw. Zulieferfläche darstellen. Die Reihenfolge der abgefragten Parzellen bzw. Transportpfade ergibt sich aus der absteigend sortierten Parzellengröße. Insgesamt werden in der Untersuchung ca. 800 Einzelpfade abgeglichen. Abbildung 94 zeigt die räumliche Verteilung der zur Evaluierung der Transportpfade herangezogenen landwirtschaftlichen Parzellen und Hofstellen.

Hinsichtlich der geschätzten Hof-Feld-Transportentfernung zeigt sich für die untersuchten Pfade die in Abbildung 95 dargestellte empirische Verteilungsfunktion. Verglichen mit den bayernweiten Kennzahlen (Abschnitt 8.5.3) weisen die betrachteten Routen relativ große Transportdistanzen auf.

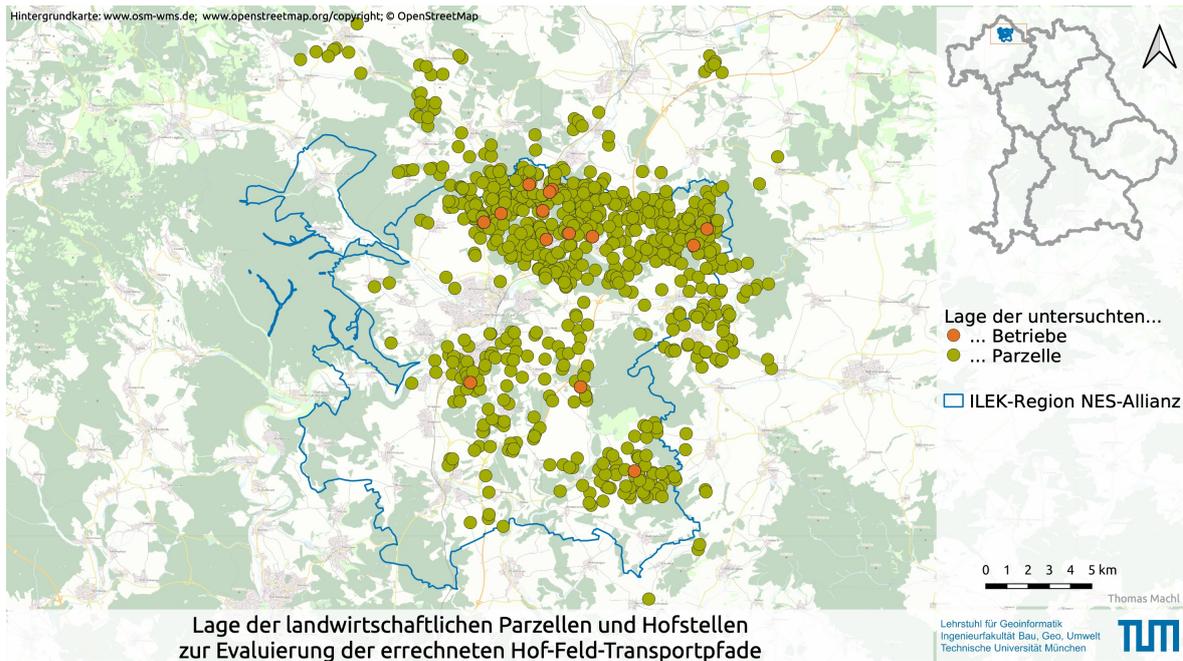


Abbildung 94: Position der zur Evaluierung von Hof-Feld-Transportpfaden herangezogenen landwirtschaftlichen Parzellen und Hofstellen

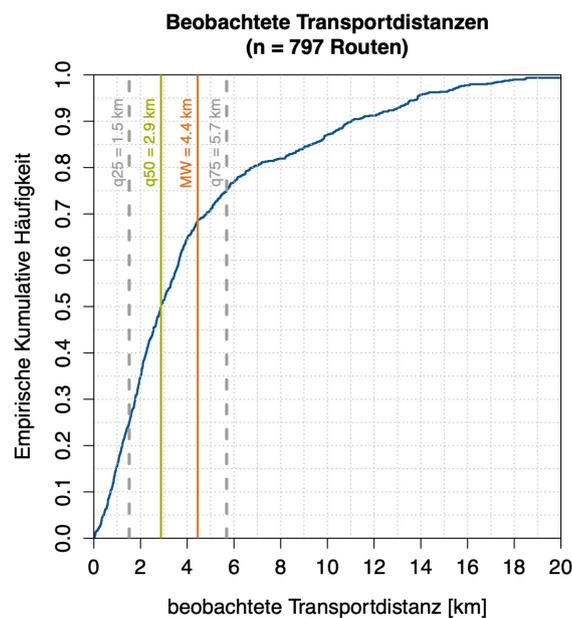


Abbildung 95: Summenhäufigkeitsfunktion der geschätzten Fahrdistanzen für die zur Evaluierung von Hof-Feld-Transportrouten untersuchten Pfade (Machl et al. 2018)

8.6.3 Ergebnisse der Evaluierung

Abbildung 96 (links) zeigt eine Gegenüberstellung der errechneten und der tatsächlichen Transportentfernungen für die in der Evaluierung berücksichtigten Parzellen in Form eines Streudiagramms. In den Untersuchungen zeigt sich ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen den geschätzten und den beobachteten Hof-Feld-Transportdistanzen. Der enge lineare Zusammenhang lässt sich auch anhand einer Regressionsanalyse bestätigen. Bei

einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,99 ergibt sich in der linearen Regressionsanalyse mit einem Steigungskoeffizienten von 0,98 ein Wert nahe 1,00 und für die Regressionskonstante mit einem Wert von 0,03 ein Wert nahe 0,00.

Neben der hohen Schätzqualität hinsichtlich der Transportdistanzen zeigt sich in der Untersuchung für die Einzelrouten auch ein hoher Grad der Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen und den geschätzten Pfadverläufen. Abbildung 96 (rechts) veranschaulicht die Übereinstimmung zwischen den beobachteten und den geschätzten Pfadverläufen für die betrachteten Transportrouten. Dazu sind die Einzelpfade mit absteigendem Übereinstimmungsgrad entlang der x-Achse und der jeweilige Grad der Übereinstimmung entlang der y-Achse aufgetragen. Für 73 % der untersuchten Pfade zeigt sich eine vollständige Übereinstimmung zwischen den errechneten und den tatsächlich beobachteten Pfadverläufen. 76 % der betrachteten Einzelpfade weisen eine Übereinstimmung von mehr als 90 % der Länge des geschätzten Pfadverlaufes auf. 80 % der evaluierten Pfade überdecken sich zu mindestens 80 % ihrer Länge mit dem errechneten Routenverlauf.

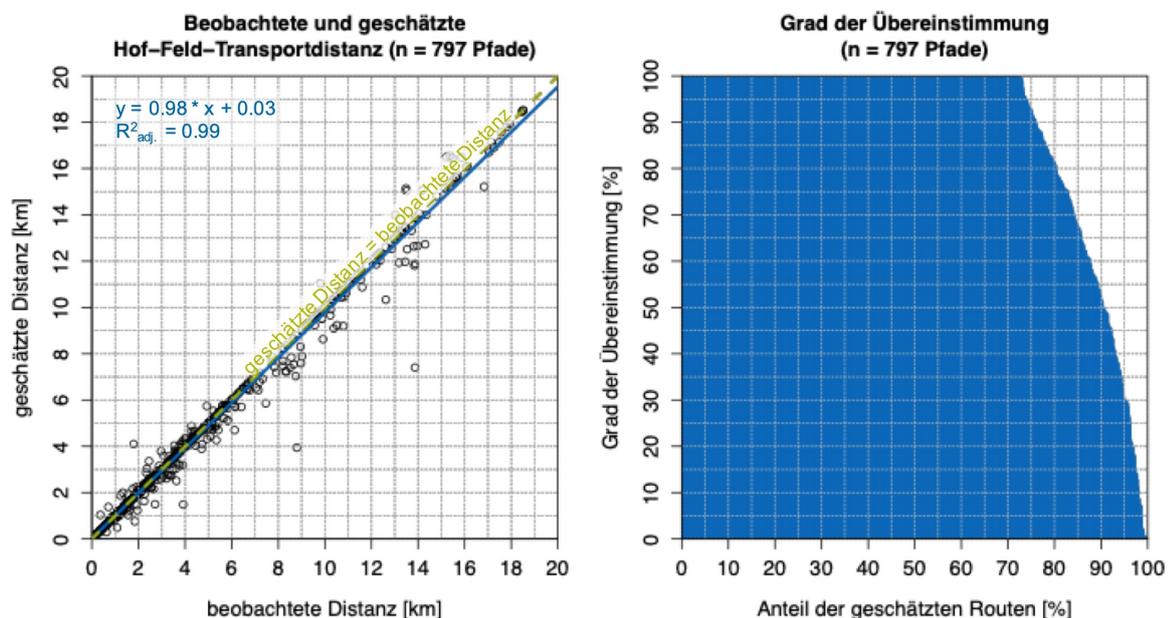


Abbildung 96: Streudiagramm geschätzter und beobachteter Transportdistanzen (links); Grad der Übereinstimmung zwischen beobachteten und geschätzten Transportpfaden (rechts) (Machl et al. 2018, Datengrundlage: Astner 2017)

Als Hauptursachen für Abweichungen zwischen errechneten und tatsächlichen Pfaden sind nach Astner (2017) und Machl et al. (2018) insbesondere folgende Aspekte anzuführen (in absteigender Relevanz ihres Auftretens in der Untersuchung):

- Meidung von schadhafte bzw. aufgrund ihrer Beschaffenheit nicht für landwirtschaftliche Fahrzeuge befahrbaren Verkehrswegen
- Meidung von Verkehrswegen mit sehr starker Steigung
- Meidung vom Autoverkehr stark frequentierter Straßen
- Umfahrung von unterdimensionierten Verkehrsbauwerken (z.B. Traglast von Brücken oder Lichtraumprofil von Unterführungen)

Entsprechende Informationen sind in den landesweit verfügbaren Angaben zu Einzelsegmenten des ATKIS[®] nicht enthalten und lassen sich daher auch nicht unmittelbar in den Analysen berücksichtigen (z.B. anhand einer Anpassung von Kantengewichten).

8.6.4 Schlussfolgerungen

In den Untersuchungen zeigt sich sowohl für die Fahrdistanzen als auch für die Pfadverläufe eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den errechneten und den tatsächlichen Transportrouten. Demnach ermöglicht der Ansatz einer Minimierung der Pfadkostensumme eine sehr realitätsnahe Nachbildung der Routenwahl des landwirtschaftlichen Verkehrs. Dabei lassen sich unterschiedliche Präferenzen für verschiedene Wegekategorien über Wegekategorie-spezifische Gewichtungsfaktoren gut abbilden. Diese Gewichtungsfaktoren lassen sich den einzelnen Segmenten des Verkehrsnetzes auf Grundlage der in den ATKIS[®]-Daten enthaltenen Angaben zuordnen. In der Untersuchung stellen sich starke Steigungen von Verkehrswegen, schadhafte Wegabschnitte und hinsichtlich Traglast bzw. Abmessungen für landwirtschaftliche Fahrzeuge unterdimensionierte Verkehrsbauwerke als wesentliche Hauptursachen für vereinzelt auftretende, größere Abweichungen zwischen den geschätzten und den tatsächlich genutzten Pfaden heraus. Angaben zu diesen Eigenschaften einzelner Wegsegmente sind bislang nicht in den ATKIS[®]-Daten zum Verkehrswegenetz enthalten und daher derzeit (noch) nicht in den Schätzungen berücksichtigt.

Insgesamt ermöglicht der entwickelte Ansatz eine realitätsnahe Abbildung der Hof-Feld-Transportpfade, so dass auch für die Untersuchungen zu Transportentfernungen sowie für die aus Einzelpfaden abgeleiteten Angaben - beispielsweise zur geschätzten Erschließungsfläche von Einzelsegmenten (siehe Abschnitt 10) - von einer belastbaren Schätzqualität auszugehen ist.

8.7 Diskussion des entwickelten Ansatzes

Das hier beschriebene Werkzeug ermöglicht erstmals eine bayernweit flächendeckende und einzelschlagbezogene Abschätzung der Hof-Feld-Transportpfade bei gleichzeitig höchstmöglicher Detailschärfe auf Ebene von Einzelobjekten. Der entwickelte Ansatz liefert damit auch erstmals belastbare und regional differenzierte Angaben zu tatsächlichen Hof-Feld-Transportentfernungen sowie zur Zusammensetzung einzelner Pfade. Die Analyse stützt sich dabei ausschließlich auf flächendeckend verfügbare Geodaten der Landwirtschaftsverwaltung sowie auf amtliche Geobasisdaten der Landesvermessungsverwaltung (hier LDBV). Damit ist eine Übertragung der Analysen auf andere Bundesländer mit überschaubarem Aufwand verbunden. Im Kontext des Projekts LandModell^{TUM} wurden bereits erste Untersuchungen in Bundesland Hessen durchgeführt. Die Pfadberechnung ist weitestgehend automatisiert, wodurch sich im Sinne eines Monitorings die Analysen regelmäßig wiederholen lassen. Somit lässt sich in weiterführenden Untersuchungen auch die zeitliche Entwicklung von Transportentfernungen detailliert analysieren.

Die in den Analysen gewonnenen Informationen dienen zur semantischen Anreicherung der betreffenden Objekte und stehen damit auf Einzelobjektebene für aufbauende Untersuchungen zur Verfügung. Aufgrund der kleinteiligen Abbildung der errechneten Routen in Form von Verweisen auf die jeweils beteiligten Objekte setzen sich die Pfade aus ihren Ein-

zelbestandteilen zusammen und verfügen gleichzeitig über einen Bezug zu den jeweiligen Elementen *Parzelle*, *Hofstelle* und *Straßensegment*. Für weiterführende Analysen besteht dadurch vollständiger Zugriff auf sämtliche Informationen zu den beteiligten Komponenten sowie insbesondere auch deren Eigenschaften. So lassen sich beispielsweise für einzelne Parzellen neben der Geometrie eines Pfades und dessen Länge auch detaillierte Angaben zur Pfadzusammensetzung ableiten. Umgekehrt ist es möglich, einzelnen Segmenten des Verkehrswegenetzes detaillierte Informationen zur Fläche und Anzahl der darüber angebotenen Parzellen bzw. Kulturarten zuzuordnen. Dieser Aspekt ist grundlegender Bestandteil des Abschnitts 10.

Mit Hilfe des entwickelten Ansatzes ist es möglich, für das Jahr 2018 97 % der Parzellen entsprechende Angaben zu Hof-Feld-Transportpfaden zuzuordnen. Für etwa 3 % der Parzellen lassen sich aufgrund nicht geokodierbarer Adressangaben oder aber wegen fehlender Verkehrsanbindung von Parzellen/Hofstellen keine Pfade ermitteln.

Das grundlegende Prinzip der Routenberechnung beruht auf einer Minimierung der Pfadkostensumme zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und den jeweils bewirtschaftenden Betrieben auf Grundlage von Daten zum Verkehrswegenetz. Dabei sind aufgrund der Datenlage folgende Grundannahmen zu treffen:

1. Adresse des Antragstellers entspricht der Lage einer Hofstelle
2. Die für die Anfahrt einer Parzelle gewählte Route entspricht dem Pfad mit der geringsten Kostensumme. Die Kosten für die Befahrung eines Verkehrswegs ergeben sich aus dessen Länge und der Präferenz des landwirtschaftlichen Verkehrs für die jeweilige Wegekategorie, welche in Form von Fahrgeschwindigkeiten zum Ausdruck kommt
3. Ausgangs- und Zielposition eines kostenminimalen Pfades befinden sich entlang von Verkehrswegen innerhalb eines Suchradius um eine Parzelle bzw. eine Hofstelle

Werden diese Annahmen für einzelne Fahrbeziehungen verletzt, so kann es zu einer fehlerhaften Einschätzung des Transportpfades kommen. Beispielsweise könnte die Adresse des Betriebsinhabers bzw. des Antragstellers nicht mit dem Ort der Hofstelle übereinstimmen (*Verletzung der Grundannahme 1*). Ein entsprechender Fall könnte beispielsweise dann auftreten, wenn ein Betrieb über mehrere Hofstellen verfügt oder es sich bei einer Hofstelle um einen Aussiedlerhof handelt. Geodaten zur tatsächlichen Lage von Hofstellen mit Zuordnung zu landwirtschaftlichen Parzellen sind derzeit nicht verfügbar. Sollten künftig entsprechende Daten verfügbar sein, so könnte dadurch die Schätzqualität ggf. verbessert werden. Zur Verbesserung der lokalen Schätzqualität könnten entsprechende Angaben jedoch regional erhoben und in den Analysen berücksichtigt werden.

Als Ursache für eine *Verletzung der Grundannahme 2* könnten beispielsweise für landwirtschaftliche Fahrzeuge hinsichtlich Abmessungen oder Traglast unterdimensionierte Unterführungen bzw. Brücken auftreten. Möglicherweise könnten auch starke Steigungen einzelner Verkehrswege zu einer Meidung durch den landwirtschaftlichen Verkehr führen. Entsprechende Verkehrswege könnten in den Analysen über eine Verminderung der Präferenz (= Erhöhung der Kantengewichtungsfaktoren) berücksichtigt werden. Aufgrund fehlender Angaben im ATKIS[®] lassen sich derartige Einschränkungen derzeit noch nicht in der landesweit flächendeckenden Analyse berücksichtigen. Entsprechende Information könnte zur Verbesserung der lokalen Schätzqualität mit Bezug auf ATKIS[®]-Wegsegmente erhoben und dadurch im Analyseprozess berücksichtigt werden.

Aufgrund ungünstiger topographischer Gegebenheiten könnte es unter Umständen zu einer *Verletzung der Grundannahme 3* kommen. Beispielsweise könnte sich zwischen einer landwirtschaftlichen Parzelle und einem als Ausgangssegment in Betracht kommenden Weg ein deutlicher Höhenunterschied ergeben bzw. ein Graben liegen, so dass ein Weg bzw. die gewählte Position entlang des Wegs nicht als Ausgangspunkt eines Pfades dienen kann. Eine umfassendere Berücksichtigung des topographischen Kontexts könnte an dieser Stelle zu einer Verfeinerung der Schätzung beitragen.

Eine Quantifizierung des durch Verstöße gegen die getroffenen Annahmen verursachten Fehlers ist nicht unmittelbar möglich. Allerdings kann in einer umfassenden Befragung von Landwirten gezeigt werden, dass der entwickelte Schätzansatz eine äußerst realitätsnahe Nachbildung der tatsächlichen Anfahrtswege ermöglicht. In der Befragung von Landwirten lässt sich für 73 % der Transportpfade eine vollständige Übereinstimmung der errechneten Pfade mit den tatsächlich genutzten Routen beobachten. 80 % der errechneten Pfade stimmen zu mindestens 80 % mit den tatsächlich genutzten Route überein. Größere Abweichungen zwischen errechneten und tatsächlichen Pfaden ergeben sich in der Untersuchung hauptsächlich durch Verletzung der Grundannahme 2, namentlich durch die Meidung schadhafter oder stark ansteigender Wegabschnitte sowie durch die Umfahrung hinsichtlich Lichtraumprofil oder Tragfähigkeit unterdimensionierter Verkehrsbauwerke. Trotz der vereinzelt auftretenden größeren Abweichungen zwischen tatsächlichem und geschätzten Routenverlauf zeigen sich lediglich in Einzelfällen größere Diskrepanzen zwischen der beobachteten und errechneten Transportdistanz. Die Meidung einzelner Wegabschnitte ist also selten mit größeren Umwegen verbunden, weshalb für die Berechnung der Transportdistanzen von einer sehr hohen Robustheit auszugehen ist. Ebenso führt eine höher als angenommene tatsächliche Präferenz einzelner Landwirte für bestimmte Wegekategorien selten zu einer Verkürzung der tatsächlichen Hof-Feld-Distanz gegenüber den geschätzten Distanzen. Diese Tatsachen lassen zusammenfassend den Rückschluss zu, dass sich die von Landwirten genutzten Hof-Feld-Transportpfade anhand des entwickelten Ansatzes einer Minimierung der Pfadkostensumme realistisch ableiten lassen.

Die Route Hof-Feld stellt, wie bereits in Abschnitt 8.1 dargestellt, eine der grundlegendsten Transportbeziehungen in der Landwirtschaft dar, so dass entsprechend große Massen zwischen diesen beiden Orten bewegt werden. Darüber hinaus gewinnen jedoch auch Transportbeziehungen zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und zentralen Sammelstellen, wie beispielsweise Biogasanlagen, eine zunehmende Bedeutung. Diese Transportpfade lassen sich mangels flächendeckender Datenverfügbarkeit zu bestehenden Transportbeziehungen derzeit nicht im landesweiten Monitoring der Transportentfernungen berücksichtigen.

Die Beobachtungen im Zusammenhang mit der Abschätzung von Hof-Feld-Transportpfaden legen den Schluss nahe, dass das implementierte Werkzeug im Allgemeinen eine realistische Abschätzung der mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen zurückgelegten Pfade zwischen bekannten Ausgangs und Zielpositionen zulässt. Im Rahmen künftiger Arbeiten sollten daher auch die Potentiale des Werkzeugs zur Berechnung von Feld-Feld-Fahrten evaluiert werden. Wären auch diese Fahrbeziehungen berücksichtigt, so könnte ein umfassendes Monitoring sämtlicher Transportpfade in der Landwirtschaft erfolgen.

9 Werkzeug zur Analyse der Verkehrsanbindung von Parzellen

Hintergrund des in diesem Abschnitt dargestellten Moduls ist die Neugestaltung der Gebietskulissen zur Abgrenzung von *aus naturbedingten oder anderen spezifischen Gründen benachteiligten Gebieten* im Sinne einer Förderung durch den *Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums* ELER im Rahmen der nationalen bzw. föderalen Umsetzung der Verordnung (EU) Nr. 1305/2013 des Europäischen Parlaments und des Rats. Die Anbindungsqualität landwirtschaftlicher Parzellen an das bestehende Verkehrswegenetz stellt ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung möglicher struktureller Benachteiligungen bei der Bewirtschaftung von Parzellen dar. Aus diesem Grund nennt Artikel 17 der Verordnung die Erschließung land- und forstwirtschaftlicher Flächen als eine der förderfähigen Maßnahmen zur Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung ländlicher Gebiete (Europäisches Parlament und Rat 2013). Auch in der nationalen Umsetzung in Form des *Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum* (EPLR) für das Land Bayern wird der Verkehrserschließung ländlicher Räume im Allgemeinen sowie der „zeitgemäße[n] verkehrsmäßige[n] Erschließung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen“ eine wesentliche Bedeutung zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ländlicher Räume beigemessen (BayStMELF und BayStMUV 2017).

Im Zuge einer bayernweiten Überarbeitung der ELER-Kulissen zur Abgrenzung von *aus naturbedingten oder anderen spezifischen Gründen benachteiligten Gebieten* im Jahr 2017 soll die Verkehrsanbindung landwirtschaftlicher Parzellen als zusätzlicher Parameter in die Auswahl entsprechender Regionen einfließen. Neben detaillierten und landesweit homogenen Informationen zur Erschließung landwirtschaftlicher Parzellen durch das land- und forstwirtschaftliche Wegenetz fehlen bisher auch belastbare Angaben zur Anbindungsqualität landwirtschaftlicher Parzellen an das überörtliche Verkehrswegenetz. Zu diesem Zweck sind Konzepte, Methoden und Indikatoren für eine landesweit flächendeckende, quantitative und detaillierte Untersuchung der Verkehrsanbindung landwirtschaftlicher Parzellen zu entwickeln.

Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Beschreibung der Konzepte und Werkzeuge zur Berechnung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrsnetz sowie auf die Darstellung grundlegender Ergebnisse. Die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse für die Ableitung räumlicher Kulissen einer möglichen Benachteiligung von Gebieten durch eine ungünstige Erschließungssituation erfolgt am *Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur* (IBA) der *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft* (LfL) und ist daher nicht Gegenstand dieses Kapitels.

9.1 Verwandte Arbeiten

In der Literatur finden sich abgesehen von einzelfallbezogenen Betrachtungen keine flächendeckenden bzw. regional differenzierten Angaben zur Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überörtliche Wegenetz. Die wenigen Untersuchungen stützen sich zumeist auf Befragungen mit räumlich begrenztem Umfang. So enthält beispielsweise Forschungsgruppe Agrar- und Regionalentwicklung Triesdorf (2013) die Ergebnisse einer Befragung zur Erschließungssituation von Parzellen im Alpenraum. Die Betrachtung beschränkt sich dabei ausschließlich auf die Erschließung von Almen.

Im Rahmen der umfangreichen Literaturrecherche finden sich keine Arbeiten, welche die Anbindung von Parzellen an das überörtliche Verkehrswegenetz flächendeckend untersuchen. Ebenso wenig finden sich quantitative und qualitative Angaben zur Verkehrsanbindung landwirtschaftlicher Parzellen.

9.2 Forschungsfragen

Im Rahmen der Untersuchungen ergeben sich sowohl fachlich-inhaltliche wie auch methodische Forschungsfragen. Als fachlich-inhaltliche Fragestellungen seien angeführt:

1. Welche Parzellen sind durch bestehende Wege erschlossen?
2. Wie groß ist die Transportentfernung zwischen einzelnen Parzellen und überörtlichen Verkehrswegen?
3. Wie setzen sich die Transportpfade zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrswegenetz zusammen?
4. Inwiefern sind die landwirtschaftlichen Parzellen über Wege erschlossen, welche auch für landwirtschaftliche Fahrzeuge ausgelegt sind?
5. Wie lässt sich die Erschließungsqualität von Einzelparzellen anhand objektiver Kriterien quantifizieren?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen setzt die Beantwortung einer Reihe methodischer Problemstellungen voraus. Hierzu zählen insbesondere:

1. Wie lässt sich basierend auf der Lage von Parzellen und Wegsegmenten sowie auf Grundlage der Topologie des Wegesystems aus der Vielzahl möglicher Pfade diejenige Kombination aus Start- und Zielposition ermitteln, welche die minimalen Pfadgesamtkosten zwischen einer Parzelle und einem Knoten des überörtlichen Wegenetz aufweist?
2. Wie ist es möglich, für einzelne Parzellen neben Angaben zu minimalen Pfadkosten auch quantitative Informationen zur Anbindungsqualität bereitstellen zu können?

9.3 Konzeptionelle Überlegungen

Dieser Abschnitt beschreibt die grundsätzlichen Überlegungen zur Analyse der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrswegenetz. Dabei erfolgt zunächst eine Abgrenzung zwischen dem landwirtschaftlichen und dem übergeordneten Verkehrswegenetz bevor die Herangehensweise zur Abschätzung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrswegenetz näher erläutert wird. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschreibt die Abbildung der Ergebnisse im Informationsmodell.

9.3.1 Definition von überörtlichem und landwirtschaftlichem Wegenetz

Während das übergeordnete bzw. überörtliche Verkehrswegenetz in erster Linie einer überregionalen Vernetzung dient, besteht die Aufgabe des landwirtschaftlichen Wegenetzes vornehmlich in einer unmittelbaren Erschließung land- und forstwirtschaftlicher Parzellen. Gemäß der Abgrenzung der BBV Landsiedlung (2014) sind Bundes-, Staats, Kreis- sowie Gemeindeverbindungsstraße im Sinne des Bayerisches Straßen- und Wegegesetzes (BayStrWG) dem übergeordneten (Kern-)Wegenetz zuzuordnen. Verkehrswege, deren Hierarchie sich den übergeordneten Wegen unterordnet, hingegen zählen zu den ergänzenden ländlichen Wegen. Hierunter fallen neben ausgebauten sowie nicht ausgebauten öffentlichen Feld- und Waldwegen auch beschränkt öffentliche Wege sowie Eigentümerwege.

9.3.2 Konzeptionelle Überlegungen zur Analyse der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das übergeordnete Verkehrswegenetz

Für eine Analyse und Bewertung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das übergeordnete Verkehrssystem sind zunächst grundlegende Annahmen zu treffen. Diese Annahmen lauten wie folgt:

- Die Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Wegenetz erfolgt über den kostenminimalen Pfad zwischen einer Parzelle und dem übergeordneten Verkehrsnetz.
- Mögliche Ausgangspositionen eines kostenminimalen Pfades befinden sich entlang von Wegsegmenten innerhalb eines Suchradius r_{Parzelle} im Umfeld von landwirtschaftlichen Parzellen.
- Als Zielknoten eines kostenminimalen Pfades zwischen Parzellen und dem übergeordneten Straßensystem kommen Knoten des Wegesystems in Betracht, welche eine Verbindung zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrswegenetz herstellen.
- Befindet sich innerhalb des Suchradius r_{Parzelle} um eine Parzelle ein Segment des übergeordneten Verkehrssystems, so ist die Parzelle unmittelbar an das übergeordnete Verkehrssystem angebunden.

Ausgehend von diesen Annahmen ergibt sich für die Ableitung des kostenminimalen Pfades die Herausforderung, dass sowohl im Umfeld landwirtschaftlicher Parzellen als auch für Zielknoten (= Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem

Verkehrswegenetz) zahlreiche Ausgangs- bzw. Zielpositionen infrage kommen können. Entsprechend kommen für jede Parzelle unter Umständen sehr zahlreiche Kombinationen aus Start und Zielknoten eines möglicherweise kostenminimalen Verbindungspfades in Betracht. Abbildung 97 veranschaulicht diese Herausforderung anhand eines Beispiels.

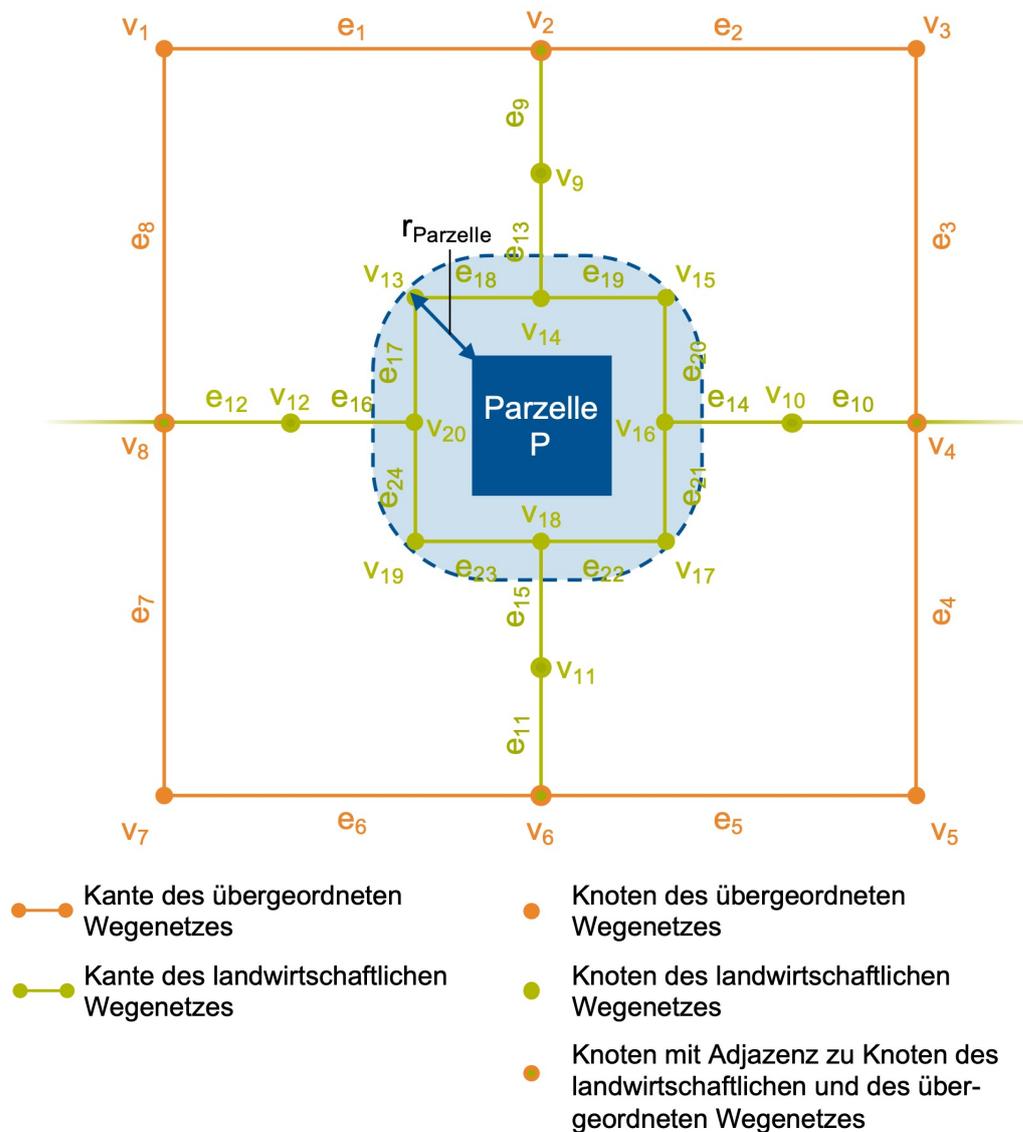


Abbildung 97: Beispiel zur Veranschaulichung der Problemstellung bei der Berechnung des kostenminimalen Pfades zwischen der Parzelle P und dem übergeordneten Verkehrswegenetz

Als Ausgangspositionen eines möglicherweise kostenminimalen Pfades zwischen der Parzelle P und einem Verbindungsknoten zum übergeordneten Verkehrswegenetz kommen im Beispiel sämtliche Positionen entlang der Kanten e_{17} , e_{18} , e_{19} , e_{20} , e_{21} , e_{22} , e_{23} und e_{24} , einige Positionen entlang der Kanten e_{13} , e_{14} , e_{15} und e_{16} sowie auch die Knoten v_{13} , v_{14} , v_{15} , v_{16} , v_{17} , v_{18} , v_{19} und v_{20} in Betracht. Mögliche Zielknoten eines kostenminimalen Pfades könnten im Beispiel die Knoten v_2 , v_4 , v_6 und v_8 sein. Im Beispiel existieren also mindestens acht tatsächliche Knoten (zuzüglich weiterer Positionen entlang der Liniensegmente) und vier Zielknoten eines möglicherweise kostenminimalen Pfades zwischen der Parzelle P und einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz. Für die Bestimmung der minimalen Pfadkosten ergeben sich im

einfachen Beispiel bei ausschließlicher Berücksichtigung der tatsächlichen Knoten des Graphen für die Parzelle P bis zu 32 zu prüfende Kombinationen aus Start- und Zielknoten. Hinzu kommen noch etliche weitere und daher zu prüfende Kombinationen, die sich aus möglichen Ausgangspositionen entlang der Wegsegmente ergeben.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Ableitung minimaler Pfadkosten zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem übergeordneten Verkehrswegenetz stützt sich im Wesentlichen auf die Tatsache, dass sich die Gesamtkosten eines entsprechenden Pfades aus zwei Komponenten zusammensetzen:

1. Pfadkosten zwischen einem tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und einem tatsächlichen Verbindungsknoten zum übergeordneten Verkehrsnetz entlang von Segmenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes
2. Pfadkosten entlang eines Segments des landwirtschaftlichen Wegenetzes zwischen einer Ausgangsposition im Umfeld einer Parzelle und einem tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes

Während sich Ausgangspositionen im Umfeld von Parzellen sowie die davon ausgehenden Pfadkosten bis zum Erreichen eines Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes entsprechend dem bereits in Abschnitt 8.3.1.2 im Kontext der Abschätzung von Hof-Feld-Transportpfaden erläuterten Vorgehen ermitteln lassen, erfordert die Zuweisung der minimalen Pfadkosten zwischen tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zum übergeordneten Verkehrswegenetz zusätzliche konzeptionelle Überlegungen.

Zur Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz und tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes ist es erforderlich, zunächst eine weitere Differenzierung der Bestandteile des Verkehrswegenetzes durchzuführen. Demnach setzt sich das Verkehrsnetz zusammen aus:

- Kanten und Knoten des übergeordneten Verkehrsnetzes
- Kanten und Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes
- Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes mit Verbindungsfunktion zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Wegenetz (äquivalent zu sog. *Brücken* im Sinne der Graphentheorie)
- Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz (äquivalent zu sog. *Artikulationspunkten* im Sinne der Graphentheorie)
- Knoten einer trennenden Kante zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz mit ausschließlicher Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes

Bezugnehmend auf das bereits in Abbildung 97 eingeführte Beispiel sind in Abbildung 98 die Bestandteile des Netzwerks entsprechend dieser Klassifikation differenziert dargestellt.

Werden nun sämtliche Brücken zwischen dem landwirtschaftlichen und dem übergeordneten Verkehrsnetzwerks – im Beispiel also die Kanten e_9 , e_{10} , e_{11} und e_{12} – herausgenommen, so zerfällt das gesamte Wegenetz in mehrere Teilgraphen. Diese Teilgraphen lassen sich eindeutig dem landwirtschaftlichen oder dem übergeordneten Verkehrsnetz zuordnen.

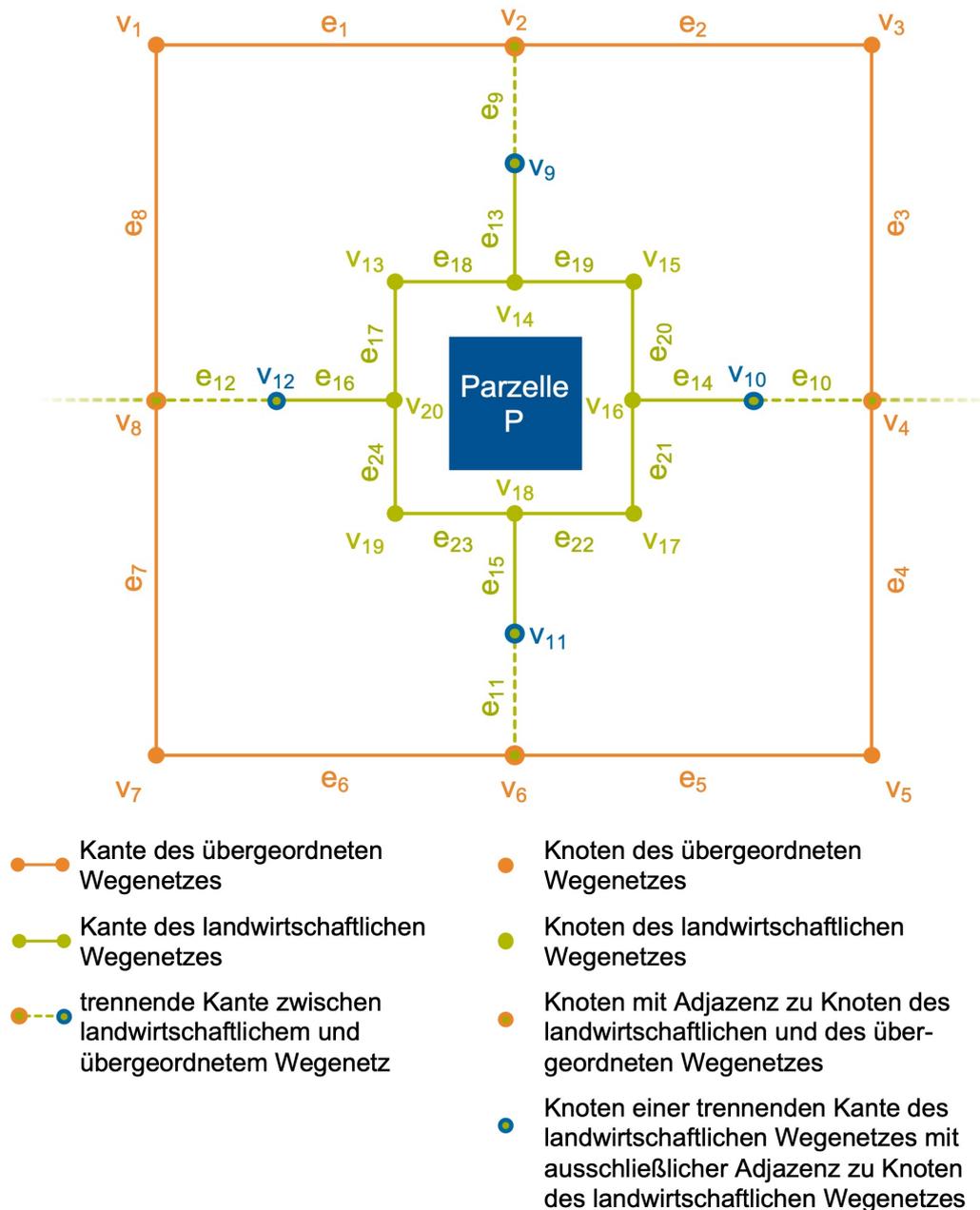


Abbildung 98: Einteilung der Bestandteile des Wegenetzes in Kanten und Knoten des landwirtschaftlichen bzw. übergeordneten Verkehrsnetzes, Brücken sowie Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz

Die durch Ausblendung von Brücken entstehenden Teilgraphen des landwirtschaftlichen Wegenetzes enthalten für jede Brücke jeweils einen Knoten, welcher eine ausschließliche Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und einer Brücke aufweist. In Beispiel der Abbildung 98 entsprechend diese den Knoten v_9 , v_{10} , v_{11} und v_{12} . Ausgehend von diesen Ausgangsknoten lassen sich nun mit Hilfe bekannter Algorithmen zur Ableitung minimaler Pfadkosten (z.B. Algorithmus nach Dijkstra 1959) den einzelnen Knoten des aus Komponenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes bestehenden Teilgraphen die minimalen Pfadkosten zuordnen. Werden diesen Pfadkosten zusätzlich die Kosten der jeweiligen Brücke zum übergeordneten Verkehrsnetz hinzugerechnet, so entspricht die jeweilige Kostensumme den minimalen Gesamtkosten zwischen einem Knoten des landwirtschaftlichen

Wegenetzes und einem Verbindungsknoten mit Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des übergeordneten Verkehrswegenetzes. Den Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes werden dabei neben Angaben zur minimalen Kostensummen auch Informationen zur Identität des Zielknoten zugeordnet. Aus der Menge sämtlicher kürzester Pfade zu Verbindungsknoten zum übergeordneten Verkehrswegenetz kann nun für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes derjenige Pfad selektiert werden, welcher die jeweils minimalen Pfadkosten zu einem der Verbindungsknoten aufweist. Für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes sind damit sowohl die minimalen Pfadkosten als auch die Identität des Verbindungsknoten bekannt.

Den einzelnen landwirtschaftlichen Parzellen sind nun mögliche Ausgangssegmente und mögliche Ausgangspositionen eines möglichen kostenminimalen Pfades zuzuordnen. Der dabei verfolgte Ansatz entspricht der bereits in Absatz 8.3.1.2 beschriebenen Herangehensweise. Innerhalb eines Suchradius r_{Parzelle} (siehe Abbildung 97) um die landwirtschaftlichen Parzellen werden dazu mögliche Ausgangssegmente selektiert entlang derer sich potentielle Ausgangspositionen eines kostenminimalen Pfades befinden können. Befindet sich innerhalb des Suchradius r_{Parzelle} ein Wegsegment des übergeordneten Verkehrswegenetzes, so gilt diese Parzelle als unmittelbar vom übergeordneten Wegenetz erschlossen. Allen Ausgangspositionen entlang möglicher Ausgangssegmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes lassen sich nun die entstehenden Pfadkosten entlang der jeweiligen Segmente bis zum Erreichen des Start- bzw. Endpunkt (= Start- und Endknoten einer Kante des Wegenetzes) zuordnen. Die Pfadkosten zwischen einer Ausgangsposition und dem Start- bzw. Endpunkt des Segments ergeben sich anteilig aus den Pfadkosten eines Segments und der mittels linearer Referenzierung verorteten Position eines Ausgangspunkts relativ zum Start- bzw. Endpunkt eines Segments. Für jede Kombination aus einer Parzelle und infrage kommenden tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes lassen sich nun jeweils die minimalen Pfadkosten zu einer möglichen Ausgangsposition angeben. Das Vorgehen folgt damit dem bereits in Abschnitt 8.3.1.2 bereits ausführlich dargestellten Ansatz.

Sind nun die minimalen Pfadkosten zwischen tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und den Verbindungsknoten zum übergeordneten Verkehrsnetz sowie auch für jede Parzelle die minimalen Kosten zwischen einer Ausgangsposition und einem tatsächlichen Knoten bekannt, so lässt sich nach Zusammenführung beider Kostenkomponenten der Pfad mit minimalen Gesamtkosten selektieren. Damit stehen auch für jede Parzelle die Start- und Zielknoten des kostenminimalen Pfades zum übergeordneten Wegenetz fest, welche im nächsten Schritt die Grundlagen für die Ausgabe der Pfadbestandteile bilden.

9.3.3 Ausgabe der Pfade und Abbildung der Ergebnisse

Nachdem für jede Parzelle Ausgangs- und Zielposition des kostenminimalen Pfades zum übergeordneten Verkehrsnetz feststehen, lassen sich wiederum mit Hilfe des Algorithmus nach Dijkstra (1959) die Bestandteile der Pfade ableiten. Die Abbildung der Pfade erfolgt analog dem in Abschnitt 8.3.1.5 bereits erläuterten Konzept kleinteilig in Form von Verweisen auf Feldstücke bzw. Segmente des Verkehrswegenetzes. Dabei werden die einzelnen Bestandteile des Pfades über den Ansatz der linearen Referenzierung im Sinne der ISO-Norm 19148:2012 (ISO 2012) abgebildet. Die kleinteilige Abbildung der Wegstrecke als Summe ihrer Einzelbestandteile ermöglicht eine große Vielzahl weiterführender Analysen.

9.3.4 Erforderliche Erweiterungen des semantischen Datenmodells

Zur Abbildung der Pfade dient der selbe Ansatz, welcher auch bereits für die Hof-Feld-Transportpfade eingesetzt ist (siehe Abschnitt 8). Die Verbindungspfade zwischen Parzellen und dem übergeordneten Verkehrswegenetz sind als Klasse *PathToSupraregionalRoadNetwork* im LandModell^{TUM}-Paket *AgriculturalTransportation* abgebildet (siehe Abschnitt 8.3.2). Die Klasse *PathToSupraregionalRoadNetwork* ist dabei eine Spezialisierung der abstrakten Klasse *AbstractTransportationPath* und besitzt eine Assoziation zur abstrakten Klasse *AbstractAgriculturalPlot* des Pakets *AgriculturalLandUse*.

9.4 Implementierung der Analysewerkzeuge

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst die zusätzlich genutzten Softwarekomponenten und Datengrundlagen bevor detailliert auf die Implementierung des Analysewerkzeugs zur Berechnung der kostenminimalen Pfade zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrswegenetz eingegangen wird.

9.4.1 Verwendete Software

Die Berechnung der Pfadkosten zwischen Parzellen und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überregionalem Verkehrswegenetz sowie auch die Ermittlung von Ausgangs- und Zielknoten der jeweils kostenminimalen Pfade erfolgt datenbankseitig unter Verwendung der *PostgreSQL*-Erweiterung *pgRouting* (pgrouting.org). Die Ausgabe der Pfadbestandteile ist als FME-Workspace umgesetzt.

9.4.2 Datengrundlagen

Als Datengrundlage dienen Geodaten des InVeKoS bzw. des LPIS sowie Geobasisdaten des LDBV, die entsprechend in die Struktur des LandModell^{TUM} überführt werden. Eine umfassende Beschreibung der Datenquellen findet sich in den Abschnitten 5.4.1 bzw. 5.4.2.

9.4.3 Implementierung der Analysemethoden

Die folgenden Abschnitte zeigen zunächst das datenbankseitige Vorgehen zur Ermittlung der minimalen Pfadkosten zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrswegenetz einschließlich der dazu nötigen, datenbankseitigen Aufbereitung der Daten. Anschließend wird das Verfahren zur Ausgabe und Speicherung der Pfadbestandteile näher beschrieben.

9.4.3.1 Ableitung von Inzidenz- und Adjazenzbeziehungen

Das geometrischen Liniennetzwerk der Verkehrswege ist datenbankseitig zunächst durch Ableitung von Inzidenz- bzw. Adjazenzbeziehungen in eine Graphstruktur zu überführen. Dieser Schritt erfolgt innerhalb des Datenbanksystems mit Hilfe der Funktion `pgr_createTopology()` der *PostgreSQL/PostGIS*-Erweiterung *pgRouting*. Die Funktion überführt die über identische Start- und Endkoordinaten einzelner Segmente implizit vorhandene Topologie des Liniennetzwerks in eine explizite Netztopologie. Dabei wird einerseits eine Tabelle der Knoten ausgegeben und andererseits werden die Kanten um Angaben zur Adjazenz von Knoten angereichert. Die einzelnen Segmente besitzen damit nun Verweise auf Start- und Zielknoten des jeweiligen Segments bzw. der jeweiligen Kante.

9.4.3.2 Klassifikation der Elemente des Verkehrswegenetzes

Bevor mit der Ermittlung der Pfadkosten begonnen werden kann, sind zunächst die für die Analysen grundlegenden Komponenten des Wegenetzes zu klassifizieren. Diese umfassen entsprechend den konzeptuellen Überlegungen: 1. Kanten des überörtlichen Verkehrsnetzes, 2. Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes, 3. Knoten mit Inzidenz sowohl zu Kanten des landwirtschaftlichen als auch des überörtlichen Wegenetzes sowie 4. Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes mit Adjazenz zu Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz. Die Abbildung dieser vier Komponenten erfolgt in Form von Datenbanksichten, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Kanten des überörtlichen Wegenetzes: Dem überörtlichen Verkehrswegenetz werden Wegsegmente zugerechnet, welche den ATKIS[®]-Objektarten *AX_Strassenachse* bzw. *AX_Farbahnachse* entstammen, gemäß ATKIS[®] eine Widmung als Bundes-, Staats-, Kreis- oder Gemeindestraße aufweisen und deren Oberflächenmaterial nicht „zerkleinertes Gestein“ ist. Die Erzeugung der Datenbanksicht *Edge_SRN* für die Abbildung von Kanten des übergeordneten Verkehrswegenetzes (supraregional road network, SRN) wird mit SQL-Ausdruck 13 erzeugt. Die Bezeichnungen der Widmung, der Verkehrsbedeutung sowie auch des Oberflächenmaterials entstammen dabei unmittelbar den Angaben des ATKIS[®].

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "Edge_SRN" AS
2   SELECT oid,
3          source,
4          target,
5          geometry,
6          "weightingFactor"
7   FROM "RoadSegment"
8   WHERE "roadCategory" = '13070_Gemeindestraße'
9         AND ("surfaceMaterial" <> '12500_Gestein, zerkleinert'
10              OR "surfaceMaterial" IS NULL)
11         AND ("significanceForTraffic" <> '20020_Anliegerverkehr'
12              OR "significanceForTraffic" IS NULL)
13         OR "roadCategory" = '13060_Kreisstraße'
14         AND ("surfaceMaterial" <> '12500_Gestein, zerkleinert'
15              OR "surfaceMaterial" IS NULL)
16         OR "roadCategory" = '13050_Staatsstraße'
17         OR "roadCategory" = '13030_Bundesstraße';

```

Listing 13: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht *Edge_SRN* für die Abbildung von Kanten des übergeordneten Verkehrswegenetzes (vereinfacht)

Edge_SRN enthält neben dem Objektidentifikator des Segments (Attribut *oid*), den Fremdschlüsselverweisen auf Start- und Endknoten der Kante (Attribute *source* und *target*), der Geometrie (Attribut *geometry*) auch ein Feld für den Kantengewichtungsfaktor (Attribut *weightingFactor*).

Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes: Dem landwirtschaftlichen Wegenetz sind insbesondere Wegsegmente der ATKIS®-Objektart *AX_Fahrwegachse* zugeordnet. Hierunter fallen asphaltierte und nicht asphaltierte Hauptwirtschaftswege, Wirtschaftswegen sowie Fahrwegspuren. Zusätzlich werden dem landwirtschaftlichen Wegenetz auch Gemeindestraßen, deren Verkehrsbedeutung ausschließlich der Anliegerverkehr ist, sowie auch nicht asphaltierte Gemeinde- und Kreisstraßen zugeordnet. Die entsprechende Datenbanksicht *Edge_ARN* zur Abbildung des landwirtschaftlichen Wegenetzes (agricultural road network, ARN) wird mit SQL-Ausdruck 14 erzeugt. Auch hier entstammen die Bezeichnungen der Wegekategorie den Angaben des ATKIS®.

Analog zu *Edge_SRN* enthält *Edge_ARN* Angaben zum Objektidentifikator des Segments (Attribut *oid*), zu den Fremdschlüsselverweisen auf Start- und Endknoten der Kante (Attribute *source* und *target*), zur Geometrie (Attribut *geometry*) sowie zum Kantengewichtungsfaktor (Attribut *weightingFactor*).

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "Edge_ARN" AS
2   SELECT oid,
3         source,
4         target,
5         geometry,
6         "weightingFactor"
7 FROM "RoadSegment"
8 WHERE function = '52110_Hauptwirtschaftsweg geteert / betoniert'
9    OR function = '52111_Hauptwirtschaftsweg nicht geteert / betoniert'
10  OR function = '52120_Wirtschaftsweg'
11  OR function = '52121_Fahrwegspur'
12  OR "roadCategory" = '13070_Gemeindestraße'
13     AND ("surfaceMaterial" = '12500_Gestein, zerkleinert'
14        OR "significanceForTraffic" = '20020_Anliegerverkehr')
15  OR "roadCategory" = '13060_Kreisstraße'
16     AND "surfaceMaterial" = '12500_Gestein, zerkleinert';

```

Listing 14: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht *Edge_ARN* für die Abbildung von Kanten des landwirtschaftlichen Verkehrswegenetzes (vereinfacht)

Knoten mit Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des überörtlichen Wegenetzes: Als Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz gelten diejenigen Knoten, welche gleichzeitig eine Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des überörtlichen Wegenetzes aufweisen und daher entsprechend von Kanten beider Arten referenziert werden. Die Abbildung entsprechender Knoten erfolgt in der Datenbanksicht *ConnectionNode_ARN_SRN*, welche mit dem SQL-Ausdruck 15 erzeugt wird. Zur Selektion entsprechender Knoten werden die Kanten des überörtlichen Wegenetzes (*Edge_SRN*) mit Kanten des landwirtschaftlichen Verkehrsnetzes (*Edge_ARN*) anhand der Identifikatoren von Start- und Endknoten verknüpft (Zeilen 9 bis 12 bzw. 20 bis 23). Dieser Schritt wird sowohl für die Startknoten (Zeilen 5 bis 12) als auch für die Endknoten (Zeilen 16 bis 23) der Elemente aus *Edge_SRN* durchgeführt. Die beiden im weiteren Verlauf über UNION zusammengeführten Teilmengen der Knoten verfügen über Angaben zum Identifikator (Attribut *idPhysicalNode*) sowie über die Lage (Attribut *geometry*) des Knotens. Als Ergebnis liefert die Datenbanksicht *ConnectionNode_ARN_SRN* die distinkten

Verweise auf die Identifikatoren des Knoten mit Adjazenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des überörtlichen Wegenetzes sowie auch deren Position zurück.

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "ConnectionNode_ARN_SRN"
2 AS
3 SELECT DISTINCT "idPhysicalNode"
4     geometry
5 FROM (SELECT "Edge_SRN".source
6     AS "idPhysicalNode",
7     st_startpoint("Edge_SRN".geometry)
8     AS geometry
9 FROM "Edge_SRN" "Edge_SRN"
10 JOIN "Edge_ARN" "Edge_ARN"
11 ON "Edge_SRN".source = "Edge_ARN".source
12 OR "Edge_SRN".source = "Edge_ARN".target
13
14 UNION
15
16 SELECT "Edge_SRN".target
17     AS "idPhysicalNode"
18     st_endpoint("Edge_SRN".geometry)
19     AS geometry
20 FROM "Edge_SRN" "edge_SRN"
21 JOIN "Edge_ARN" "edge_ARN"
22 ON "Edge_SRN".target = "Edge_ARN".source
23 OR "Edge_SRN".target = "Edge_ARN".target) "ConnectionNode_ARN_SRN";

```

Listing 15: SQL-Ausdruck für die Erzeugung der Datenbanksicht *ConnectionNode_ARN_SRN* zur Abbildung von Knoten mit Inzidenz zu Kanten des landwirtschaftlichen und des überörtlichen Wegenetzes (vereinfacht)

Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes mit Adjazenz zu Verbindungsknoten zwischen übergeordnetem und landwirtschaftlichem Wegenetz: Eine Sonderform der Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes stellen diejenigen Knoten dar, welche Kante des landwirtschaftlichen Wegenetzes eine Adjazenz zu Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz besitzen. Diese Knoten dienen im weiteren Verlauf als Ausgangsknoten für die Zuweisung der minimalen Kosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überregionalem Verkehrsnetz.

Zur Abbildung entsprechender Knoten für die spätere Ermittlung der Pfadkosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen sowie Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz dient die Datenbanksicht *StartNodeCostAssignment*, welche mit dem SQL-Ausdruck 16 erzeugt wird. In der Sicht werden die Verweise auf jene Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes selektiert, welche über eine Kante des landwirtschaftlichen Wegenetzes (*Edge_ARN*) eine Adjazenzbeziehung mit Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überregionalem Wegenetz (*ConnectionNode_ARN_SRN*) aufweisen. Als entsprechende Knoten gelten:

- Endknoten von Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes, deren Startknoten einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überregionalem Verkehrsnetz entspricht (Zeilen 7 bis 18) und
- Startknoten von Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes, deren Endknoten einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überregionalem Verkehrsnetz entspricht (Zeilen 22 bis 33)

Dabei dürfen diese Knoten nicht selbst Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz sein.

Zur Selektion entsprechender Knoten sind zunächst die Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes *Edge_ARN* mit Verbindungsknoten *ConnectionNode_ARN_SRN* über die Verweise die Identifikatoren der jeweiligen Knoten zu verknüpfen (Zeilen 13 - 15 und 28 - 30). Diese Verknüpfung liefert als Ergebnismenge jene Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes, die eine trennende Funktion zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Wegesystem aufweisen. Von diesen Kanten werden die dem Verbindungsknoten gegenüberliegenden Knoten der Kante benötigt (Zeilen 7 und 8 bzw. 22 und 23).

Um zu überprüfen, dass die gesuchten Knoten nicht gleichzeitig auch selbst eine Verknüpfung zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz darstellen, erfolgt zusätzlich ein `LEFT JOIN` zwischen den Kanten der Ergebnismenge aus *Edge_ARN* und den Verbindungsknoten aus *ConnectionNode_ARN_SRN* über den Identifikator des Verbindungsknotens und den Identifikatoren des gegenüberliegenden Knoten der jeweiligen Kante (Zeilen 16 und 17 bzw. 31 und 32). Führt diese Verknüpfung zu keinem Treffer, so ist sichergestellt, dass der entsprechende Knoten keine Verbindungsfunktion zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz besitzen (Zeilen 18 und 33).

Zusätzlich sind den Ausgangsknoten für die spätere Ermittlung die Pfadkosten zum Verbindungsknoten zwischen dem landwirtschaftlichen und dem überregionalen Verkehrsnetz zuzuordnen. Diese entsprechen dem Produkt aus der Länge des jeweiligen Wegsegments und dem Gewichtungsfaktor (Zeile 11 und 12 bzw. 26 und 27).

Neben den Verweisen auf die späteren Ausgangsknoten (Attribut *idStartNode*) für eine Zuweisung minimaler Kosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zwischen Segmenten des landwirtschaftlichen und des übergeordneten Verkehrsnetzes, den Verweisen auf die Identifikatoren der jeweiligen Verbindungsknoten zwischen beiden Wegenetzen (Attribut *idConnectionNode_ARN_SRN*) liefert die Sicht auch die minimalen Pfadkosten zwischen den jeweiligen Ausgangsknoten und dem Verbindungsknoten aus *ConnectionNode_ARN_SRN* (Attribut *CostToPhysicalNode_ARN_SRN*) zurück. Zu diesem Zweck werden die Elemente der Ergebnismenge zunächst aufsteigend nach Pfadkosten zwischen einem entsprechenden Ausgangsknoten und einem Verbindungsknoten aus *ConnectionNode_ARN_SRN* sortiert (Zeilen 34 und 35) und für jeden Ausgangsknoten über den Ausdruck `DISTINCT ON ()` das erste Element der Ergebnismenge selektiert (Zeile 3).

Die Sicht *StartNodeCostAssignment* enthält den Verweis auf den Identifikator des Ausgangsknotens für die spätere Kostenzuweisung (Attribut *idStartNode*), den Verweis auf den Identifikator des jeweiligen Verbindungsknotens zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Verkehrsnetz (Attribut *idConnectionNode_ARN_SRN*) sowie die minimalen Kosten zwischen einem Ausgangsknoten für die spätere Kostenzuweisung und dem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Verkehrsnetz (Attribut *costToNode_ARN_SRN*).

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "StartNodeCostAssignment"
2 AS
3 SELECT DISTINCT ON ("idStartNode")
4     "idStartNode",
5     "idConnectionNode_ARN_SRN",
6     "costToNode_ARN_SRN"
7 FROM (SELECT "Edge_ARN".target
8         AS "idStartNode",
9         "ConnectionNode_ARN_SRN_1"."idPhysicalNode"
10        AS "idConnectionNode_ARN_SRN",
11        st_length("Edge_ARN".geometry) * "Edge_ARN"."weightingFactor"
12        AS "costToNode_ARN_SRN"
13 FROM "Edge_ARN"
14     JOIN "ConnectionNode_ARN_SRN" "ConnectionNode_ARN_SRN_1"
15     ON "ConnectionNode_ARN_SRN_1"."idPhysicalNode" = "Edge_ARN".source
16     LEFT JOIN "ConnectionNode_ARN_SRN" "ConnectionNode_ARN_SRN_2"
17     ON "ConnectionNode_ARN_SRN_2"."idPhysicalNode" = "Edge_ARN".target
18 WHERE "ConnectionNode_ARN_SRN_2"."idPhysicalNode" IS NULL
19
20 UNION
21
22 SELECT "Edge_ARN".source
23        AS "idStartNode",
24        "ConnectionNode_ARN_SRN"."idPhysicalNode"
25        AS "idConnectionNode_ARN_SRN",
26        st_length("Edge_ARN".geometry) * "Edge_ARN"."weightingFactor"
27        AS "costToNode_ARN_SRN"
28 FROM "Edge_ARN"
29     JOIN "ConnectionNode_ARN_SRN" "ConnectionNode_ARN_SRN_1"
30     ON "ConnectionNode_ARN_SRN_1"."idPhysicalNode" = "Edge_ARN".target
31     LEFT JOIN "ConnectionNode_ARN_SRN" "ConnectionNode_ARN_SRN_2"
32     ON "ConnectionNode_ARN_SRN_2"."idPhysicalNode" = "Edge_ARN".source
33 WHERE "ConnectionNode_ARN_SRN_2"."idPhysicalNode" IS NULL) "startNode"
34 ORDER BY "idStartNode",
35        "costToNode_ARN_SRN" ASC;

```

Listing 16: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht *StartNodeCostAssignment* für die Abbildung von Ausgangsknoten für die Ermittlung der Pfadkosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz (vereinfacht)

9.4.3.3 Berechnung der minimalen Kostensumme zwischen Parzellen und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Verkehrswegenetz

Nachdem nun die für die Ermittlung der kostenminimalen Pfade benötigten Komponenten des Verkehrswegenetzes in Form der Datenbanksichten *Edge_SRN*, *Edge_ARN*, *ConnectionNode_ARN_SRN* und *StartNodeCostAssignment* vorliegen, kann mit der Ermittlung der minimalen Pfadkostensumme zwischen Parzellen und Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Verkehrswegenetz begonnen werden. Entsprechend dem konzeptuellen Ansatz setzen sich die Pfadkosten zusammen aus 1. den Kosten zwischen möglichen Ausgangspositionen entlang von Wegsegmenten im Umfeld von Parzellen und physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und 2. den Kosten zwischen physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten zwischen dem landwirtschaftlichen und dem überörtlichen Wegenetz - jeweils entlang von Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes.

Die Berechnung der beiden Kostenkomponenten sowie auch deren Zusammenführung erfolgt ebenfalls datenbankseitig in Form entsprechender Datenbanksichten. Diese sollen in den folgenden Abschnitten vorgestellt und näher beleuchtet werden. Als maximal zulässige

Distanz zwischen einem Startsegment und einer Parzelle wird ein Wert von 25 m angenommen, die Kantengewichte entsprechen der Segmentlänge (Gewichtungsfaktor = 1,0)

Berechnung der Pfadkosten zwischen Startpositionen im Umfeld von Parzellen und physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes: Im Umfeld landwirtschaftlicher Parzellen sind zunächst innerhalb des nutzerdefinierbaren Suchradius r_{Parzelle} potentielle Ausgangssegmente und Ausgangspositionen eines möglicherweise kostenminimalen Pfades zu identifizieren und die Pfadkosten zwischen diesen Positionen und den physischen Knoten zu ermitteln. Dabei wird analog dem bereits in Abschnitt 8.3.1.2 im Kontext der Berechnung von Hof-Feld-Transportpfaden beschriebenen Ansatz vorgegangen. Die Suche nach Ausgangspositionen sowie auch die Berechnung der davon ausgehenden Pfadkosten entlang der jeweiligen Segmente hin zu tatsächlichen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes ist datenbankseitig in Form der Sicht *Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN* umgesetzt, welche mit dem SQL-Ausdruck 17 erzeugt wird. Als Ausgangspositionen kommen im Umfeld der Parzellen in Betracht:

- senkrechte Projektion der Polygonstützpunkte einer landwirtschaftlichen Parzelle auf Segmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes (*Edge_ARN*) innerhalb des Suchradius r_{Parzelle} um eine Parzelle (Zeilen 18 bis 48 bzw. 58 bis 88)
- Schnittpunkte des äußeren Polygonumrings einer Parzelle mit Segmenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (*Edge_ARN*; Zeilen 97 bis 128 bzw. 137 bis 168)
- Linienstützpunkte des landwirtschaftlichen Wegenetzes *Edge_ARN* innerhalb des Suchradius r_{Parzelle} um Parzellen (Zeilen 177 bis 213 bzw. 222 bis 258)

Die infrage kommenden, physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes entsprechen den Start- und Endknoten der betreffenden Ausgangssegmente *Edge_ARN*. Im weiteren Verlauf sind daher die Pfadkosten zwischen den Ausgangspositionen und physischen Knoten entlang von Segmenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes zu ermitteln. Diese Pfadkosten ergeben sich anteilig an den Kosten eines Segments und dem zwischen einer Ausgangsposition und einem physischen Knoten zurückzulegenden Längenanteil bezogen auf die Gesamtlänge eines Segments. Dabei entsprechen die Pfadkosten für ein Segment dem Produkt aus Kantengewichtungsfaktor (*weightingFactor*) und der Länge eines Segments, welche sich aus der Geometrie einer Kante der Menge *Edge_ARN* mit Hilfe der PostGIS-Funktion *st_length()* ermitteln lässt (Zeilen 21 und 22, 61 und 62, 99 und 100, 139 und 140, 179 und 180 sowie 224 und 225).

Zur Bestimmung der relativen Position eines Ausgangspunkts entlang von Ausgangssegmenten dient die PostGIS-Funktion *st_linelocatepoint()*. Als Eingangsparameter benötigt diese Funktion einerseits die Geometrie des Segments und andererseits die Geometrie des zu verortenden Punkts. Die Funktion liefert einen Zahlenwert im Intervall von 0,0 (= Startpunkt eines Segments) bis 1,0 (= Endpunkt des Segments). Der ausgehend von einer Startposition bis zum Erreichen eines tatsächlichen Knoten zurückzulegende Längenanteil eines Segments entspricht damit:

- für den Startknoten eines Segments der relativen Position des Ausgangspunkts bezogen auf die Länge des Ausgangssegments (Zeilen 18 bis 20, 97 und 98 sowie 177 und 178) und

- für den Endknoten eines Segments der Differenz aus 1,0 und der relativen Position des Ausgangspunkts bezogen auf die Länge des Ausgangssegments (Zeilen 58 bis 60, 137 und 138 sowie 222 und 223)

Die anteiligen Pfadkosten zwischen einem Ausgangspunkt entsprechen dem Produkt aus den Pfadkosten eines Segments und dem zurückzulegenden Längenanteil bis zum Erreichen des Start- (Zeilen 18 bis 23, 97 bis 101 und 177 bis 181) bzw. Endpunkt (Zeilen 58 bis 63, 137 bis 141 und 222 bis 226) eines Wegsegments. Aus der Menge möglicher Ausgangspunkte lassen sich nun für jede Kombination aus Parzelle und infrage kommenden physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes diejenigen selektieren, welche die geringsten Pfadkosten zu einem physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes aufweisen. In der Datenbanksicht werden zu diesem Zweck die Ergebnisse nach Pfadkosten aufsteigend sortiert (Zeilen 259 - 261) und anschließend für jede Kombination aus Parzelle (Attribut *idFarmerBlock*) und physischem Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *idPhysicalNode*) über `DISTINCT ON ()` der erste Tupel der Ergebnismenge selektiert (Zeile 3).

Als Ergebnis liefert die Datenbanksicht neben den Verweisen auf die Identifikatoren der Parzelle (Attribut *idFarmerBlock*) und des jeweiligen physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *idPhysicalNode*) auch die minimalen Pfadkosten für jede Kombination aus Parzelle und physischem Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN*) zurück. Darüber hinaus erfolgt auch die Ausgabe der Lage der Ausgangsposition in Form einer Punktgeometrie (Attribut *geometryVirtualNodeParcel*) sowie auch in Form eines Verweises auf ein Segment (Attribut *idSegment*) und der relativen Position des Ausgangspunkts entlang dieses Segments (Attribut *positionAlongSegment*). Daneben ist auch die Distanz zwischen einer Parzelle und einer Ausgangsposition Bestandteil der Ausgabe (Attribut *distParcelRoad*).

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"
2 AS
3 SELECT DISTINCT ON ("idFarmerBlock", "idPhysicalNode")
4     "idFarmerBlock",
5     "idSegment",
6     "idPhysicalNode",
7     "positionAlongSegment",
8     "geometryVirtualNodeParcel",
9     "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
10    "distParcelRoad"
11 FROM (
12     -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
13     -- dem Startpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
14     -- (ausgehend von der senkrechten Projektion von Stützpunkten eines
15     -- Parzellenpolygons auf Segmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes als
16     -- Ausgangsposition)
17
18     SELECT st_linelocatepoint( Edge_ARN.geometry ,
19                               st_closestpoint(Edge_ARN.geometry ,
20                                               p."geometryVertex"))
21         * st_length(Edge_ARN.geometry)
22         * Edge_ARN."weightingFactor"
23     AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
24     Edge_ARN.oid
25     AS "idSegment"
26     st_linelocatepoint(Edge_ARN.geometry ,
27                       st_closestpoint(Edge_ARN.geometry ,
28                                       p."geometryVertex"))
29     AS "positionAlongSegment",
30     st_closestpoint(Edge_ARN.geometry ,
31                   p."geometryVertex")
32     AS "geometryVirtualNodeParcel",
33     p."idFarmerBlock",
34     Edge_ARN.source
35     AS "idPhysicalNode",

```

```

36         st_distance(Edge_ARN.geometry,
37                     p."geometryVertex")
38         AS "distParcelRoad"
39 FROM ( SELECT (st_dumpoints(geometry)).geom
40           AS "geometryVertex",
41           geometry,
42           oid
43           AS "idFarmerBlock"
44 FROM "FarmerBlock") p
45 JOIN "Edge_ARN"
46 ON st_dwithin(p."geometryVertex",
47              Edge_ARN.geometry,
48              25)
49
50 UNION
51
52 -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
53 -- dem Endpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
54 -- (ausgehend von der senkrechten Projektion von Stützpunkten eines
55 -- Parzellenpolygons auf Segmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes als
56 -- Ausgangsposition)
57
58 SELECT (1 - st_linelocatepoint(Edge_ARN.geometry,
59                               st_closestpoint(Edge_ARN.geometry,
60                                               p."geometryVertex")))
61         * st_length(Edge_ARN.geometry)
62         * Edge_ARN."weightingFactor"
63         AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
64 Edge_ARN.oid
65         AS "idSegment"
66 st_linelocatepoint(Edge_ARN.geometry,
67                   st_closestpoint(Edge_ARN.geometry,
68                                   p."geometryVertex"))
69         AS "positionAlongSegment",
70 st_closestpoint(Edge_ARN.geometry,
71                 p."geometryVertex")
72         AS "geometryVirtualNodeParcel",
73 p."idFarmerBlock",
74 Edge_ARN.target
75         AS "idPhysicalNode",
76 st_distance(Edge_ARN.geometry,
77             p."geometryVertex")
78         AS "distParcelRoad"
79 FROM ( SELECT (st_dumpoints(geometry)).geom
80           AS "geometryVertex",
81           geometry,
82           oid
83           AS "idFarmerBlock"
84 FROM "FarmerBlock") p
85 JOIN "Edge_ARN"
86 ON st_dwithin(p."geometryVertex",
87              Edge_ARN.geometry,
88              25)
89
90 UNION
91
92 -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
93 -- dem Startpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
94 -- (ausgehend von Schnittpunkten zwischen dem äußeren Polygonumring einer
95 -- Parzelle und Wegsegmenten als Ausgangsposition)
96
97 SELECT st_linelocatepoint("geometrySegment",
98                           "geometryIntersection")
99         * st_length("geometrySegment")
100        * "weightingFactor"
101        AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
102 "idSegment",
103 st_linelocatepoint("geometrySegment",
104                   "geometryIntersection")
105        AS "positionAlongSegment",
106 "geometryIntersection"
107        AS "geometryVirtualNodeParcel",
108 "idFarmerBlock",

```

```

109         "idPhysicalNode",
110         0 AS "distParcelRoad"
111 FROM ( SELECT p.oid
112         AS "idFarmerBlock",
113         (st_dumppoints(
114         st_intersection(
115         st_exteriorring((st_dump(p.geometry)).geom),
116         Edge_ARN.geometry)).geom
117         AS "geometryIntersection",
118         Edge_ARN.oid
119         AS "idSegment",
120         Edge_ARN.geometry
121         AS "geometrySegment",
122         Edge_ARN.source
123         AS "idPhysicalNode",
124         Edge_ARN."weightingFactor"
125 FROM "FarmerBlock" p
126 JOIN "Edge_ARN"
127 ON st_intersects(p.geometry,
128 Edge_ARN.geometry)) "intersectionRoadPolygon"
129
130 UNION
131
132 -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
133 -- dem Endpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
134 -- (ausgehend von Schnittpunkten zwischen dem äußeren Polygonumring einer
135 -- Parzelle und Wegsegmenten als Ausgangsposition)
136
137 SELECT (1 - st_linelocatepoint("geometrySegment",
138 "geometryIntersection"))
139 * st_length("geometrySegment")
140 * "weightingFactor"
141 AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
142 "idSegment",
143 st_linelocatepoint("geometrySegment",
144 "geometryIntersection")
145 AS "positionAlongSegment",
146 "geometryIntersection"
147 AS "geometryVirtualNodeParcel",
148 "idFarmerBlock",
149 "idPhysicalNode",
150 0 AS "distParcelRoad"
151 FROM ( SELECT p.oid
152         AS "idFarmerBlock",
153         (st_dumppoints(
154         st_intersection(
155         st_exteriorring( (st_dump(p.geometry)).geom),
156         Edge_ARN.geometry)).geom
157         AS "geometryIntersection",
158         Edge_ARN.oid
159         AS "idSegment",
160         Edge_ARN.geometry
161         AS "geometrySegment",
162         Edge_ARN.target
163         AS "idPhysicalNode",
164         Edge_ARN."weightingFactor"
165 FROM "FarmerBlock" p
166 JOIN "Edge_ARN"
167 ON st_intersects(p.geometry,
168 Edge_ARN.geometry)) "intersectionRoadPolygon"
169
170 UNION
171
172 -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
173 -- dem Startpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
174 -- (ausgehend von Stützpunkten der Liniensegmente des
175 -- landwirtschaftlichen Wegenetzes als Ausgangsposition)
176
177 SELECT st_linelocatepoint(r.geometry,
178 r."geometryVertex")
179 * st_length(r.geometry)
180 * r."weightingFactor"
181 AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",

```

```

182         "idSegment",
183         st_linelocatepoint(r.geometry,
184                             r."geometryVertex")
185         AS "positionAlongSegment",
186         r."geometryVertex"
187         AS "geometryVirtualNodeParcel",
188         p.oid
189         AS "idFarmerBlock",
190         r."idPhysicalNode",
191         st_distance(r.geometry,
192                     p.geometry)
193         AS "distParcelRoad"
194 FROM "FarmerBlock" p
195     JOIN ( SELECT (st_dumppoints(Edge_ARN.geometry)).geom
196                 AS "geometryVertex",
197                 Edge_ARN.source
198                 AS "idPhysicalNode",
199                 Edge_ARN.geometry,
200                 Edge_ARN.oid
201                 AS "idSegment",
202                 Edge_ARN."weightingFactor",
203                 "FarmerBlock".oid
204                 AS "idFarmerBlock"
205             FROM "Edge_ARN"
206             JOIN "FarmerBlock"
207                 ON st_dwithin("FarmerBlock".geometry,
208                               Edge_ARN.geometry,
209                               25)) r
210 ON r."idFarmerBlock" = p.oid
211 AND st_dwithin(p.geometry,
212                r."geometryVertex",
213                25)
214
215 UNION
216
217 -- Pfadkosten entlang eines Segments zwischen einer Ausgangsposition und
218 -- dem Endpunkt eines infrage kommenden Ausgangssegments
219 -- (ausgehend von Stützpunkten der Liniensegmente des
220 -- landwirtschaftlichen Wegenetzes als Ausgangsposition)
221
222 SELECT (1 - st_linelocatepoint(r.geometry,
223                                 r."geometryVertex"))
224         * st_length(r.geometry)
225         * r."weightingFactor"
226         AS "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN",
227         "idSegment"
228         st_linelocatepoint(r.geometry,
229                             r."geometryVertex")
230         AS "positionAlongSegment",
231         r."geometryVertex"
232         AS "geometryVirtualNodeParcel",
233         p.oid
234         AS "idFarmerBlock",
235         r."idPhysicalNode",
236         st_distance(r.geometry,
237                     p.geometry)
238         AS "distParcelRoad"
239 FROM "FarmerBlock" p
240     JOIN ( SELECT (st_dumppoints(Edge_ARN.geometry)).geom
241                 AS "geometryVertex",
242                 Edge_ARN.target
243                 AS "idPhysicalNode",
244                 Edge_ARN.geometry,
245                 Edge_ARN.oid
246                 AS "idSegment",
247                 Edge_ARN."weightingFactor",
248                 "FarmerBlock".oid
249                 AS "idFarmerBlock"
250             FROM "Edge_ARN"
251             JOIN "FarmerBlock"
252                 ON st_dwithin("FarmerBlock".geometry,
253                               Edge_ARN.geometry,
254                               25)) r

```

```

255         ON r."idFarmerBlock" = p.oid
256         AND st_dwithin(p.geometry,
257                       r."geometryVertex",
258                       25)) "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"
259 ORDER BY "idFarmerBlock",
260         "idPhysicalNode",
261         "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN";

```

Listing 17: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht `Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN` für die Ermittlung von Startpositionen und für die Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen einer Startposition und einem physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (vereinfacht)

Ermittlung der minimalen Kostensumme zwischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordnetem Wegenetz:

Nachdem nun die Lage der Ausgangspositionen und auch die Pfadkosten zwischen diesen Positionen und physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes bekannt sind, sind im nächsten Schritt den Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes die jeweils minimalen Pfadkosten zu einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz zuzuordnen. Diese Zuordnung erfolgt innerhalb der Datenbanksicht `Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN`, welche mit SQL-Ausdruck 19 erzeugt wird. Der grundlegende Gedanke besteht dabei darin, das landwirtschaftliche Wegenetz durch entfernen trennender Kanten vom überörtlichen Wegenetz abzutrennen und anschließend innerhalb der Teilgraphen des landwirtschaftlichen Wegenetzes den einzelnen Knoten die minimalen Pfadkosten zu einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz zuzuordnen.

Das zentrale Element dieser Datenbanksicht bildet die Funktion `pgr_drivingDistance()` (Zeile 12 bis 34) der PostgreSQL/PostGIS-Erweiterung `pgrouting`. Diese Funktion weist ausgehend von einer Liste an Startknoten auf Grundlage des Algorithmus nach Dijkstra (1959) den über Kanten erreichbaren Knoten die jeweils minimale Pfadkostensumme zu. Der Funktion sind folgende Eingangsparameter zu übergeben:

- Adjazenzbeziehungen der Netzwerks in Form von Verweisen auf die Identifikatoren der Netzwerkkanten (Zeilen 12 und 13), ihrer Start- (Zeile 14) und Endknoten (Zeile 15) sowie auch deren Kantengewicht in (Zeilen 16 bis 17) bzw. entgegen (Zeilen 19 bis 21) der Zeichenrichtung
- Liste der Startknoten für die Kostenzuweisung (Zeilen 29 bis 31)
- Schwellwert für die maximale Kostensumme, für die eine Zuweisung der Kosten an erreichbare Knoten vorgenommen wird (Zeile 32)

Bei der Übergabe der Netztopologie an die Funktion werden aus der Menge an Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (`Edge_ARN`) diejenigen selektiert, deren Start- oder Endknoten nicht inzident mit einer Netzwerkkante des überörtlichen Wegenetzes ist. Mit diesem Schritt erfolgt eine Abtrennung des landwirtschaftlichen vom überörtlichen Wegenetz, wodurch der Graph in Teilgraphen zerfällt. Innerhalb der Datenbanksicht werden dazu die Segmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes (`Edge_ARN`) über einen `LEFT JOIN` auf die Identifikatoren von Start- bzw. Zielknoten mit Kanten des überörtlichen Wegenetzes verknüpft (Zeilen 23 bis 27) und anschließend diejenigen Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes selektiert, die nicht vom überörtlichen Wegenetz referenziert werden (Zeile 28).

Als Ausgangsknoten der Zuweisung minimaler Kosten an die Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes dienen diejenigen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes, die über eine Inzidenz mit trennenden Kanten zwischen landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz aufweisen. Diese sind in der Datenbanksicht *StartNodeCostAssignment* enthalten (Zeile 31). Der Funktion werden diese in Form eines *Arrays* übergeben. Als Schwellwert für den Abbruch der Kostenzuweisung an Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes ist ein unendlich hoher Wert (hier durch einen sehr hohen Zahlenwert ausgedrückt) angegeben (Zeile 32). Dadurch werden sämtlichen Knoten eines Teilgraphen des landwirtschaftlichen Wegenetzes Kosten zugewiesen.

Die Funktion `pgr_drivingDistance()` liefert eine Tabelle mit einem fortlaufenden Zeilenidentifikator (Attribut *seq*), einen Verweis auf den Identifikator des Ausgangsknoten für die Kostenzuweisung (Attribut *from_v*), einen Verweis auf den jeweiligen Identifikator des Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *node*), den Identifikator und die Kosten der jeweils zuletzt für die Erreichung des Knoten genutzten Kante (Attribute *edge* und *cost*) sowie insbesondere die aggregierte Kostensumme zwischen dem Ausgangsknoten und dem jeweils betrachteten Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *agg_cost*) zurück (Zeile 34). Da jeder Ausgangsknoten der Kostenzuweisung (*StartNodeCostAssignment*) bereits über Angaben zu den jeweils minimalen Pfadkosten zu einem Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz verfügt, lassen sich durch Zusammenführung der beiden Kostenbestandteile den Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes jeweils die minimalen Gesamtkosten zu einem Verbindungsknoten zuweisen. Dazu wird die Rückgabe der Funktion `pgr_drivingDistance()` über entsprechende Schlüssel mit den Ausgangsknoten verknüpft (Zeilen 35 bis 36). Aufgrund der Tatsache, dass den einzelnen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes in der Rückgabe der Funktion `pgr_drivingDistance()` ausgehend von mehreren Startknoten die jeweils minimale Kostensumme zugewiesen wird, ist für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes derjenige Verbindungsknoten zum überörtlichen Wegenetz zu selektieren, welcher insgesamt die geringsten Pfadkosten aufweist.

Dazu werden für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes zunächst die Gesamtkosten zu den jeweiligen Verbindungsknoten durch Addition der Kostenkomponenten ermittelt, aufsteigend sortiert (Zeilen 37 und 38) und anschließend für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes über `DISTINCT ON ()` das erste Tupel (= Tupel mit geringsten Pfadkosten) selektiert (Zeile 7). Im Ergebnis verfügen die Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes über Angaben zur minimalen Kostensumme zu einem Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz (Attribut *minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN*; Zeilen 10 und 11) und über Angaben zum Identifikator (Attribut *idConnectionNode_ARN_SRN*).

Der Menge an Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes ist zudem auch die Menge der Verbindungsknoten zum überörtlichen Wegenetz (*ConnectionNode_ARN_SRN*) hinzuzufügen (Zeilen 42 bis 46). Diese weisen eine Kostensumme von 0 auf. Innerhalb der Sicht geschieht diese Zusammenführung der Teilmengen über `UNION` (Zeile 40).

Als Rückgabe liefert *Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN* für jeden Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes Angaben zum Identifikator des jeweiligen Knoten (Attribut *idPhysicalNode*), die minimale Pfadkostensumme zwischen dem Knoten und einem Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und überörtlichem Wegenetz (Attribut *minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN*) sowie den Identifikator des Verbindungsknoten (Attribut *idConnectionNode_ARN_SRN*) zurück.

```

1 CREATE OR REPLACE VIEW "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
2 AS
3 SELECT "idConnectionNode_ARN_SRN",
4        "idPhysicalNode",
5        "minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
6 FROM ((SELECT DISTINCT ON (dd.node)
7        "StartNodeCostAssignment"."idConnectionNode_ARN_SRN",
8        dd.node
9        AS "idPhysicalNode",
10       dd.agg_cost + "StartNodeCostAssignment"."costToNode_ARN_SRN"
11       AS "minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
12 FROM pgr_drivingDistance('SELECT distinct "Edge_ARN".oid
13                          AS id,
14                          "Edge_ARN".source,
15                          "Edge_ARN".target,
16                          st_length("Edge_ARN".geometry)
17                          * "Edge_ARN"."weightingFactor"
18                          AS cost,
19                          st_length("Edge_ARN".geometry)
20                          * "Edge_ARN"."weightingFactor"
21                          AS reverse_cost
22 FROM "Edge_ARN"
23 LEFT JOIN "Edge_SRN"
24 ON ("Edge_SRN".source = "Edge_ARN".target
25     or "Edge_SRN".source = "Edge_ARN".source
26     or "Edge_SRN".target = "Edge_ARN".target
27     or "Edge_SRN".target = "Edge_ARN".source)
28 WHERE "Edge_SRN".oid IS NULL',
29       (SELECT array_agg("idStartNode")
30        AS "arrayIdStartNode"
31 FROM "StartNodeCostAssignment"),
32 1000000000000,
33 false,
34 false) dd(seq, from_v, node, edge, cost, agg_cost)
35 JOIN "StartNodeCostAssignment"
36 ON dd.from_v = "StartNodeCostAssignment"."idStartNode"
37 ORDER BY dd.node,
38         (dd.agg_cost + "StartNodeCostAssignment"."costToNode_ARN_SRN"))
39
40 UNION
41
42 SELECT "ConnectionNode_ARN_SRN"."idPhysicalNode"
43        AS "idConnectionNode_ARN_SRN",
44        "ConnectionNode_ARN_SRN"."idPhysicalNode",
45        0 AS "minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
46 FROM "ConnectionNode_ARN_SRN") "MinCostSumNodeSRN_NodeARN";

```

Listing 18: SQL-Ausdruck zur Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordneten Verkehrsnetz und Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (vereinfacht)

Zusammenführung der Kostenkomponenten und Ausgabe der minimalen Pfadkostensumme: Nachdem nun einerseits die Pfadkosten zwischen Ausgangspunkten im Umfeld von Parzellen und physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Sicht *Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN*) und andererseits die Pfadkosten zwischen Knoten des landwirtschaftlichen und Verbindungsknoten zum überörtlichen Wegenetz (Sicht *Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN*) bekannt sind, lassen sich diese beiden Pfadkostenkomponenten zusammenführen und anschließend die minimalen Pfadkostensummen zwischen den Ausgangspositionen und den Verbindungsknoten ermitteln.

Diese Zusammenführung der Kosten von Teilpfaden sowie auch die Überprüfung des möglicherweise unmittelbaren Anschlusses einer Parzelle an das überörtliche Verkehrsnetz erfolgt innerhalb der materialisierten Datenbanksicht *MinCost_Parcel_ConnectionNodeARN_SRN*, deren Erzeugung in SQL-Ausdruck 19 gezeigt ist.

Um überprüfen zu können, ob landwirtschaftliche Parzellen (*FarmerBlock*; Zeile 46) ggf. direkt an überörtliche Verkehrswege angebunden sind, werden diese über einen `LEFT JOIN` auf Grundlage einer Nachbarschaftsanalyse mit einem Suchradius mit Kanten des überörtlichen Wegenetzes (*Edge_ARN*) verknüpft. Über einen weiteren `LEFT JOIN` werden den Parzellen anhand entsprechender Schlüsselverweise die Pfadkosten zwischen den Ausgangspositionen und physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (*Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN*) zugeordnet (Zeilen 51 und 52). Anschließend lassen sich den nun für Einzelparzellen infrage kommenden physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes über einen weiteren `LEFT JOIN` auf Basis von Fremdschlüsselverweisen die jeweiligen Kosten zwischen dem physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und dem Verbindungsknoten zum überörtlichen Wegenetz (*Cost_NoreARN_ConnectionNodeARN_SRN*) zuweisen (Zeilen 53 bis 55). Abschließend werden zur späteren Verortung der Zielknoten die Verbindungsknoten (*ConnectionNode_ARN_SRN*) über einen zusätzlichen `LEFT JOIN` hinzugefügt (Zeilen 56 bis 58).

Zur Selektion des Pfades mit den geringsten Pfadkosten zwischen einer Startposition im Umfeld einer landwirtschaftlichen Parzelle und einem Verbindungsknoten zwischen dem landwirtschaftlichen und dem übergeordneten Verkehrsnetz ist die Ergebnismenge zunächst nach der Summe der Pfadkosten aufsteigend zu sortieren (Zeilen 59 bis 66) und anschließend für jede Parzelle mit Hilfe des `DISTINCT ON ()`-Operators der erste Eintrag der Ergebnismenge zu selektieren (Zeile 3). Die Pfadgesamtkosten ergeben sich aus der Summe der Pfadkosten zwischen dem jeweiligen physischen Knoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes und den Pfadkosten zwischen diesen und der Ausgangsposition im Umfeld einer landwirtschaftlichen Parzelle (Zeilen 8 bis 12). Ist eine Parzelle unmittelbar an das überregionale Verkehrsnetz angebunden - dies ist dann der Fall, wenn das Ergebnis-Tupel für den Identifikator eines Segments des überregionalen Verkehrsnetzes einen Eintrag enthält - so entsprechen die Pfadkosten einem Wert von 0 (Zeile 7).

Als Ergebnis liefert die materialisierte Sicht einen Verweis auf den Identifikator der jeweiligen landwirtschaftlichen Parzelle (Attribut *idFarmerBlock*, Zeilen 4 und 5), die kleinste Pfadkostensumme zwischen der Parzelle und einem Verbindungsknoten zwischen landwirtschaftlichem und übergeordnetem Verkehrsnetz entlang von Wegen des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *minSumCost*, Zeilen 6 bis 12), die Geometrie der Ausgangsposition im Umfeld der landwirtschaftlichen Parzelle (Attribut *geometryVirtualNodeParcel*, Zeilen 13 bis 17), einen Verweis auf den Identifikator des Ausgangssegments im Umfeld der Parzelle (Attribut *idStartSegment*, Zeilen 18 bis 22), die relative Position des Ausgangspunkts entlang des Ausgangssegments (Attribut *positionAlongSegment*, Zeilen 23 bis 27), die Distanz zwischen der jeweiligen landwirtschaftlichen Parzelle und dem Ausgangssegment (Attribut *distParcelRoad*, Zeilen 29 bis 33), einen Verweis auf den Identifikator des Verbindungsknoten (Attribut *idConnectionNode_ARN_SRN*, Zeilen 34 bis 38), die Geometrie des Verbindungsknoten (Attribut *geometryConnectionNode_ARN_SRN*, Zeilen 39 bis 42) und einen Verweis auf den Identifikator des physischen Ausgangsknoten des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Attribut *idPhysicalNodeParcel*, Zeilen 44 und 45) zurück.

Das Ergebnis der Sicht bildet die Grundlage für die Ausgabe der Pfadbestandteile, welche Gegenstand des nachfolgenden Abschnitts ist.

```

1 CREATE MATERIALIZED VIEW "MinCost_Parcel_ConnectionNodeARN_SRN"
2 AS
3 SELECT DISTINCT ON (p."oid_FarmerBlock")
4     p."oid_FarmerBlock"
5     AS "idFarmerBlock",
6     CASE
7         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL THEN 0
8         ELSE "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN".
9             "minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
10            + "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN".
11              "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"
12        END AS "minSumCost",
13     CASE
14         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
15             THEN NULL
16         ELSE "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."geometryVirtualNodeParcel"
17        END AS "geometryVirtualNodeParcel",
18     CASE
19         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
20             THEN "Edge_SRN".oid
21         ELSE "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."idSegment"
22        END AS "idStartSegment",
23     CASE
24         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
25             THEN NULL
26         ELSE "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."positionAlongSegment"
27        END AS "positionAlongSegment",
28     CASE
29         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
30             THEN st_distance("Edge_SRN".geometry,
31                             "FarmerBlock".geometry)
32         ELSE "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."distParcelRoad"
33        END AS "distParcelRoad",
34     CASE
35         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
36             THEN NULL
37         ELSE "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"."idConnectionNode_ARN_SRN"
38        END AS "idConnectionNode_ARN_SRN",
39     CASE
40         WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL
41             THEN NULL
42         ELSE "ConnectionNode_ARN_SRN".geometry
43        END AS "geometryConnectionNode_ARN_SRN",
44     "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."idPhysicalNode"
45     AS "idPhysicalNodeParcel"
46 FROM "FarmerBlock"
47     LEFT JOIN "Edge_SRN"
48     ON st_dwithin("FarmerBlock".geometry,
49                 "Edge_SRN".geometry,
50                 25)
51     LEFT JOIN "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"
52     ON p."oid_FarmerBlock" = "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."id_FarmerBlock"
53     LEFT JOIN "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
54     ON "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"."idPhysicalNode"
55     = "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"."idPhysicalNode"
56     LEFT JOIN "ConnectionNode_ARN_SRN"
57     ON "ConnectionNode_ARN_SRN"."idPhysicalNode"
58     = "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN".from_v
59 ORDER BY "FarmerBlock"."oid_FarmerBlock",
60         (CASE
61             WHEN "Edge_SRN".oid IS NOT NULL THEN 0
62             ELSE "Cost_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN".
63                 "minCostSum_NodeARN_ConnectionNodeARN_SRN"
64             + "Cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN".
65               "cost_StartPositionParcel_PhysicalNodeARN"
66         END);

```

Listing 19: SQL-Ausdruck zur Berechnung der minimalen Pfadkosten zwischen Verbindungsknoten von landwirtschaftlichem und übergeordneten Verkehrsnetz und landwirtschaftlichen Parzellen (vereinfacht)

9.4.3.4 Ausgabe der Pfadbestandteile

Mit Hilfe der in den vorangegangenen Abschnitten gezeigten Datenbanksichten lassen sich für einzelne Parzellen bereits Angaben zu den minimalen Pfadkostensummen zum überörtlichen Wegenetz angeben. Weiterführende Analysen - beispielsweise zur Zusammensetzung der Pfade - benötigen neben Angaben zu Pfadkosten insbesondere Angaben zu den einzelnen Pfadbestandteilen. Die Ausgabe der jeweiligen Pfadbestandteile erfolgt mit Hilfe eines FME-Workspaces, welcher als Eingangsinformation einerseits auf die in Abschnitt 9.4.3.3 beschriebene Datenbanksicht *MinCost_Parcel_ConnectionNodeARN_SRN* und andererseits auf das geometrische Liniennetzwerk der landwirtschaftlichen Wege zurückgreift. Die Datenbanksicht liefert neben den Angaben zur minimalen Kostensumme auch Informationen zu den Identifikatoren und Positionen der Ausgangs- und Zielknoten. Zentrales Element des FME-Workspaces bildet der bereits in Abschnitt 8.4.4 vorgestellte und beschriebene Transformer *ShortestPathFinder*. Diesem Transformer ist einerseits das geometrische Liniennetzwerk der Verkehrswege und andererseits die Ausgangs- und Zielpositionen der zu ermittelnden Pfade in Form von A-B-Linien zu übergeben. Diese A-B-Linien lassen sich unmittelbar aus der Datenbanksicht *MinCost_Parcel_ConnectionNodeARN_SRN* erzeugen. Als Liniennetzwerk für die Pfadbestimmung werden dem Transformer die Segmente des landwirtschaftlichen Wegenetzes (Datenbanksicht *Edge_ARN*; siehe Abschnitt 9.4.3.2) übergeben. Analog zum im Abschnitt 9.4.3.3 erläuterten Vorgehen werden den einzelnen Kanten des landwirtschaftlichen Wegenetzes die Kosten in Form des Produkts aus Segmentlänge und Gewichtungsfaktor zugewiesen.

Die Abbildung der Pfade erfolgt gemäß dem bereits im Kontext der Abschätzung von Hof-Feld-Transportpfaden genutzten Ansatz kleinteilig in Form von linear referenzierten Verweisen auf einzelne Segmente des Verkehrswegenetzes (vgl. Abschnitt 8.3.1.5).

9.5 Ergebnisse

Für die Ermittlung der Pfade sind als Eingangsparameter zunächst Kantengewichte und maximal zulässige Distanzen zwischen Parzellen und Ausgangssegmenten festzulegen. Den in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnissen liegen hierfür die beiden folgenden Randbedingungen zugrunde: die maximal zulässige Entfernung zwischen einer Parzelle und einem Startsegment für die Pfadbestimmung beträgt weniger als 25 m und als Kantengewicht dient ausschließlich die Länge des Segments (Kantengewichtungsfaktor = 1,0).

Die kleinteilige Abbildung der ermittelten Pfade zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überörtlichen Wegenetz eröffnet eine große Vielfalt unterschiedlicher Perspektiven für weiterführende Analysen, die in den folgenden Abschnitten exemplarisch dargestellt werden. Dabei wird zunächst auf die Anteile der Parzellen eingegangen, die über eine Verbindung zum überörtlichen Wegenetz verfügen. Anschließend folgt ein Überblick der für Einzelparzellen ableitbaren Angaben zur Anbindung an das überörtliche Wegenetz, bevor die Ergebnisse einer landesweiten Betrachtung dargestellt werden. Der Abschnitt schließt mit einer kurzen Betrachtung der benötigten Ausführungszeiten für die Ermittlung der Transportdistanzen, die Ausgabe der Pfade und den Zugriff auf die im Informationssystem abgebildeten Ergebnisse.

9.5.1 Anteil der Parzellen mit Anschluss an das überörtliche Verkehrsnetz

Vor dem Hintergrund der eingangs getroffenen Annahmen verfügen bayernweit mehr als 93 % der Feldstücke über direkten oder indirekten Anschluss an das übergeordnete Verkehrsnetz. Abbildung 99 zeigt die regionale Verteilung des jeweiligen Anteils der Parzellen mit direkter bzw. indirekter Anbindung an das überörtliche Verkehrsnetz. Die Aggregation erfolgt dabei auf einem 10 km x 10 km Raster. Einzelne Parzellen sind dabei jeweils über deren Schwerpunkt den Rasterzellen zugeordnet. Die regional differenzierte Betrachtung zeigt, dass für Bayern nahezu flächendeckend ein Anteil von deutlich mehr als 90 % der Feldstücke unmittelbaren oder mittelbaren Anschluss an das übergeordnete Verkehrsnetz besitzt. Größere Abweichungen zeigen sich insbesondere im Alpenraum, wo in einigen Regionen weniger als 75 % der Parzellen über eine Anbindung an das überörtliche Verkehrsnetz verfügen. Als mögliche Ursachen für eine fehlende Verkehrsanbindung seien neben einer Nichtverfügbarkeit nutzbarer Wegen im Umfeld der Parzellen auch das Fehlen von Wegen entlang eines möglichen Pfades angeführt.

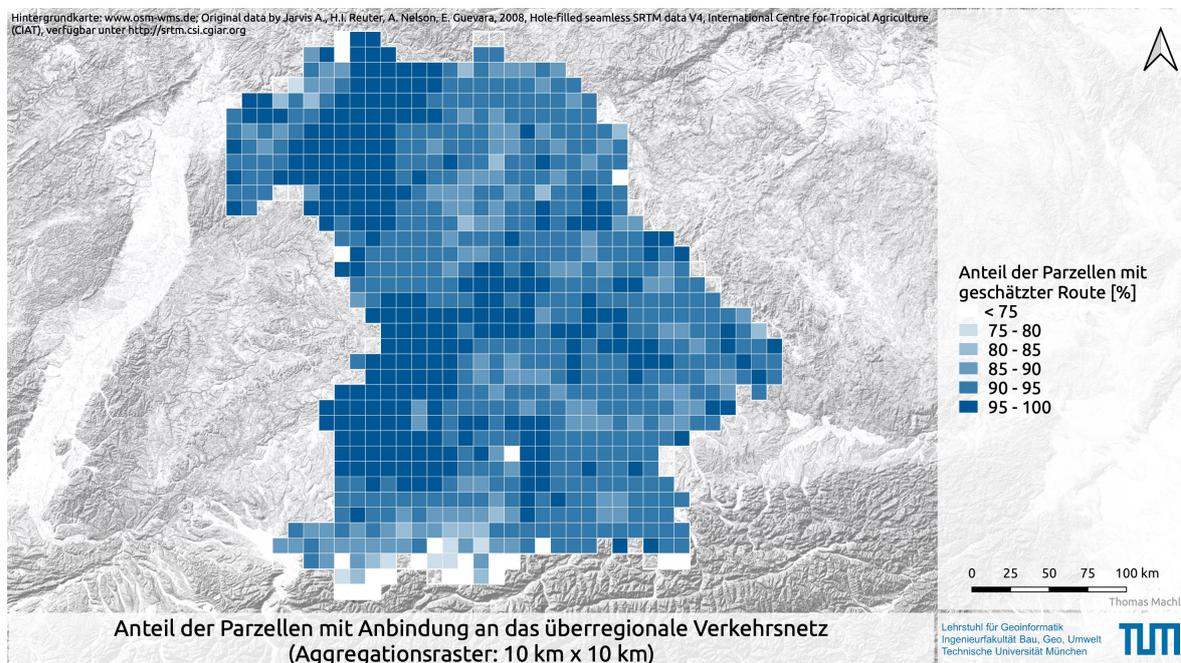


Abbildung 99: Relativer Anteil landwirtschaftlicher Parzellen (Feldstück) mit direkter bzw. indirekter Anbindung an das überörtliche Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag 01.06.2018)

9.5.2 Zusammensetzung von Einzelpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überörtlichen Straßennetz

Die kleinteilige Abbildung von Pfaden in Form von Verweisen auf einzelne Pfadb Bestandteile und landwirtschaftliche Parzellen ermöglicht analog dem bereits im Kontext von Hof-Feld-Transportpfaden dargestellten Vorgehen (Abschnitt 8.5.2) eine detaillierte Beschreibung der Zusammensetzung von Einzelpfaden. Abbildung 100 zeigt dies anhand einer zufällig ausgewählten Parzelle. Neben der Gesamtlänge des Pfades besitzen einzelne Parzellen über eine genaue Zusammenstellung der Längenanteile einzelner Wegekategorien. Diese Zusammensetzung bildet gemeinsam mit der Pfadlänge eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Erschließungsqualität in weiterführenden Arbeiten.



Abbildung 100: Geometrie und Zusammensetzung des kostenminimalen Pfades zwischen einem zufällig ausgewählten Feldstück und dem überörtlichen Verkehrsnetz (Stichtag: 01.06.2018)

9.5.3 Landesweite Betrachtung der Transportdistanzen zwischen Parzellen und dem überörtlichen Verkehrsnetz

Die für Einzelparzellen vorliegenden Informationen lassen sich für ein bayernweites Monitoring einsetzen. Abbildung 101 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion der in Bayern beobachteten Pfadlängen zwischen landwirtschaftlichen Parzellen (Feldstück) und dem überregionalen Verkehrsnetz. Der Anteil der gemäß der getroffenen Annahmen unmittelbar an das übergeordnete Verkehrsnetz angebotenen Feldstücke beträgt rund 26 %. Für 50 % der Feldstücke beträgt die Transportdistanz zum übergeordneten Straßennetz weniger als 0,3 km (q_{50}). 75 % der Feldstücke weisen eine Transportentfernung zum übergeordneten Verkehrsnetz von weniger als 0,7 km (q_{75}) auf. Entsprechend besitzen weniger als 25 % der Feldstücke eine Transportdistanz zum übergeordneten Verkehr größer als 0,7 km (q_{75}). Damit bewegt sich die Hälfte der beobachteten Transportdistanzen in Bayern in einem Bereich von 0,3 km (q_{25}) und 0,7 km (q_{75}).

Aufgrund des Konzepts der semantischen Anreicherung von Objekten des LandModell^{TUM} liegen sämtliche Informationen mit Bezug auf Einzelobjekte vor. Dadurch ist es auch möglich, eine regional differenzierte Betrachtung der Transportdistanzen durchführen zu können. Abbildung 102 zeigt das 50 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem übergeordneten Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster. Dabei zeigen sich Unterschiede hinsichtlich der bestehenden Transportentfernungen zum übergeordneten Verkehrsnetz. Insbesondere im Alpenraum, in Teilen Unter- und Oberfrankens sowie im östlichen Teil Niederbayerns zeigen sich tendenziell größere Distanzen zum übergeordneten Verkehrsnetz.

Weitere Abbildungen zu regionalen Mustern bestehender Transportdistanzen finden sich in Kapitel E des Anhangs.

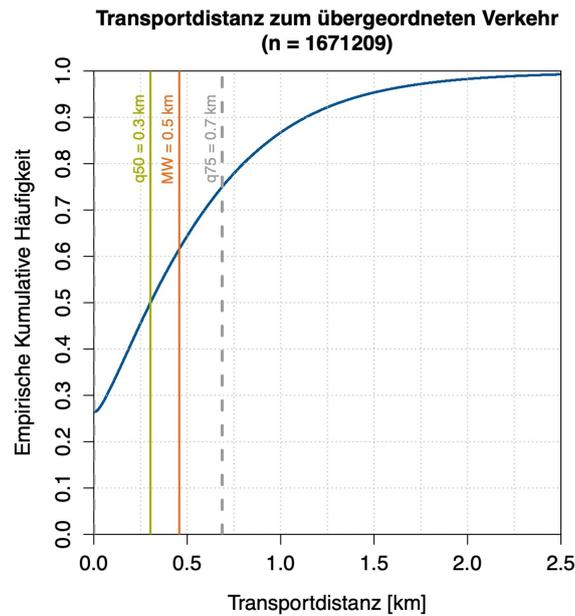


Abbildung 101: Summenhäufigkeitsfunktion der in Bayern beobachteten Pfadlänge zwischen landwirtschaftlichen Parzellen (Feldstück) und dem überörtlichen Verkehrsnetz (Stichtag: 01.06.2018)

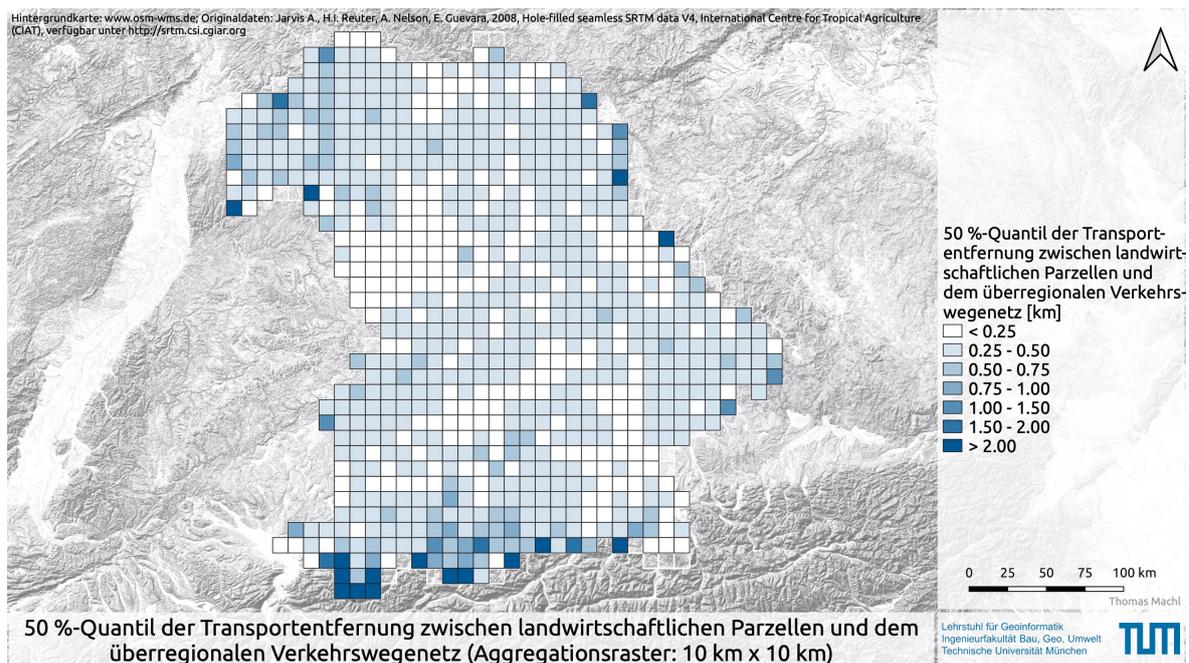


Abbildung 102: 50 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem übergeordneten Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

9.5.4 Betrachtungen zu Rechenzeit und Performanz

Die nachfolgenden beiden Abschnitte beleuchten einerseits die zur Ermittlung der Pfade benötigten Rechenzeiten sowie andererseits die für den Zugriff auf die im Informationssystem abgebildeten Ergebnisse benötigten Zeiten.

9.5.4.1 Rechenzeiten für die Ermittlung und Ausgabe der Verbindungspfade

Die Ermittlung der Verbindungspfade zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überörtlichen Verkehrsnetz erfolgt in einem zweistufigen Verfahren: Zunächst sind für jede Parzelle Ausgangs- und Zielknoten des jeweils kostenminimalen Pfades sowie auch die Pfadkostensumme zu ermitteln. Dieser Schritt erfolgt für sämtliche 1,8 Mio. Feldstücke datenbankseitig über eine materialisierte Datenbanksicht. Die Laufzeit zur Erzeugung dieser Sicht beträgt 4 h 4 min.

Auf Grundlage der nun bekannten Start- und Zielpositionen lassen sich mit Hilfe eines FME-Workspace im Hinblick auf weiterführende Analysen die einzelnen Pfadbestandteile der 1,8 Mio. Routen in Form von Verweisen auf die betreffenden Wegsegmente ausgeben. Die Laufzeit des FME-Workspace liegt mit 4 h 30 min unterhalb den in Abschnitt 8.5.4 angegebenen Ausführungszeiten zur Berechnung der Hof-Feld-Transportpfade. Ursächlich hierfür ist einerseits die entfallende Ausführungszeit für die Suche nach Start- und Zielpositionen sowie andererseits die entfallende Notwendigkeit der Berechnung von Pfaden für mehrere Kombinationen aus Ausgangs- und Zielknoten im Umfeld von Hofstellen und Parzellen.

9.5.4.2 Performanz der Rekonstruktion von Pfaden im Informationssystem

Für die Beurteilung der Performanz beim Zugriff auf die im Datenbanksystem abgebildeten Einzelpfade werden über pgAdmin für 30 Fahrbeziehungen die Laufzeiten zur Rekonstruktion der Geometrie und der Zusammensetzung von Einzelpfaden aus einzelnen Pfadbestandteilen ermittelt. Im Mittel werden hierfür für Einzelpfade etwa 10 ms je Fahrbeziehung benötigt. Die datenbankseitige Erzeugung einer Tabelle mit sämtlichen Pfaden, einschließlich der Geometrie einer detaillierten und kleinteiligen Beschreibung der Pfadzusammensetzung erfordert eine Ausführungszeit von 4 min 30 s. Damit liegt die Ausführungszeit unterhalb derer für die Rekonstruktion der Hof-Feld-Transportpfade. Die schnellere Ausführungszeit lässt sich insbesondere durch kürzere Pfadlängen und der damit einhergehenden geringeren Anzahl an Pfadkomponenten erklären.

9.6 Diskussion des entwickelten Ansatzes

Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht erstmals eine landesweit flächendeckende und einzelobjektbezogene Untersuchung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrsnetz. Die Analysen liefern dabei einerseits detaillierte Aufschlüsse zu bestehenden Transportdistanzen und gewähren andererseits gleichzeitig quantitative Einblicke in die Zusammensetzung von Transportpfaden.

Für die Berechnung der Pfade bzw. der Pfadkosten zwischen einer Parzelle und dem überörtlichen Wegenetz wird davon ausgegangen, dass die Anbindung über den jeweils kostenminimalen Pfad entlang von Segmenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes erfolgt. Das Ergebnis der Pfadberechnung ist damit insbesondere von drei Einflussfaktoren bestimmt:

1. Zuordnung von Wegsegmenten zum überörtlichen bzw. landwirtschaftlichen Wegesystem: Die Berechnung der Pfadkosten erfordert eine Unterteilung des Verkehrsnetzes in Elemente des überregionalen bzw. des landwirtschaftlichen Wegesystems.

In den hier dargestellten Untersuchungen erfolgt diese Unterscheidung anhand der in Abschnitt 9.4.3.2 dargestellten Kriterien. Werden andere Kriterien für die Zuordnung von Wegsegmenten zum landwirtschaftlichen bzw. zum überregionalen Wegesystem herangezogen, sind auch abweichende Ergebnisse zu erwarten.

2. **Pfadkosten für die Nutzung einzelner Wegsegmente:** Für die Berechnung der Pfadkosten wird im Gegensatz zur Berechnung der Hof-Feld-Transportpfade bewusst auf die Abbildung ungleicher Präferenzen für verschiedene Wegekategorien in Form unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren zur Ermittlung der Pfadkosten verzichtet. Die Kosten für die Nutzung einzelner Segmente als Bestandteil eines Pfades entsprechen der jeweiligen Segmentlänge. Damit basieren die Angaben zu den Verbindungspfaden zwischen einer Parzelle und dem überregionalen Wegenetz ausschließlich auf der Topologie und Geometrie von Segmenten des landwirtschaftlichen Wegenetzes sowie der Lage landwirtschaftlicher Parzellen. Die Angaben zum Verbindungspfad beziehen sich damit auf die kürzestmögliche Route.
3. **Wahl der Ausgangsposition für die Routenberechnung:** Als Ausgangspunkt für einen kostenminimalen Verbindungspfad kommen sämtliche Positionen innerhalb eines definierbaren Radius um eine Parzelle entlang von Wegsegmenten in Betracht. Damit sind die Ergebnisse von der maximal zulässigen Distanz zwischen Parzellen und Segmenten des Verkehrsnetzes abhängig. Möglicherweise könnten aufgrund dieser vereinfachten Annahme auch Ausgangspositionen ausgewählt werden, die in der Realwelt aufgrund topographischer Gegebenheiten (z.B. Gräben, Höhenunterschied zwischen Parzelle und Weg) nicht als solche in Frage kommen. In diesem Fall können sich vereinzelt Unschärfen hinsichtlich der Angabe zur minimalen Pfadkostensumme ergeben.

Bei der Konzeption des hier vorgestellten Werkzeugs besteht eine grundlegende Herausforderung darin, kostenminimale Pfade zwischen zunächst hinsichtlich Anzahl und Lage unbekanntem Knoten zu berechnen. Dieser Herausforderung wird in dieser Arbeit damit begegnet, dass das Verkehrswegenetz durch das Entfernen trennender Kanten zwischen dem landwirtschaftlichen und dem überörtlichen Wegesystem in nicht zusammenhängende Teilgraphen zerlegt wird.

Die Ermittlung der Pfade erfolgt in einem zweistufigen Vorgehen: Im ersten Schritt werden zunächst datenbankseitig die Ausgangs- und Endpositionen eines kostenminimalen Pfades zwischen einer Parzelle und dem überörtlichen Wegesystem bestimmt. Mit Hilfe eines darauf aufsetzenden FME-Workspace werden in einem zweiten Schritt die Bestandteile der Pfade ermittelt, ausgegeben und im Informationssystem gespeichert. Dieser zweistufige Ansatz ermöglicht einerseits für das landesweite Monitoring eine performante Ermittlung von Pfadkosten und Ausgangs- bzw. Zielposition sowie andererseits eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Ausgabe von Pfadbestandteilen für weiterführende Analysen.

Das Konzept der kleinteiligen Abbildung von Pfaden in Form von Verweisen auf die beteiligten Objekte eröffnet - wie auch bereits im Kapitel 8 dargestellt - ein sehr hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich weiterführender Analysen. Dabei reicht die Bandbreite von detaillierten, einzelparzellenbezogenen Analysen bis zu einem landesweiten Monitoring. Die kleinteilige Abbildung der Transportpfade ist unter anderem die grundlegende Voraussetzung für eine objektive und quantitative Bewertung der Pfadzusammensetzung, wodurch sich beispielsweise auch die Qualität der Verkehrserschließung einzelner Parzellen beschreiben lässt. Die Ergebnisse der hier dargestellten Untersuchungen dienen daher auch als Grundlage für weiterführende Analysen der LfL bzw. des BayStMELF im Zusammenhang mit der Überarbeitung von ELER-Kulissen zur Abgrenzung von *aus naturbedingten oder anderen spezifischen Gründen benachteiligten Gebieten*.

10 Werkzeug zur Planungsunterstützung im Ländlichen Wegebau

Mit strukturellen Veränderungen in der Landwirtschaft haben sich vielfach auch die Anforderungen des landwirtschaftlichen Transportverkehrs an die bestehende Verkehrsinfrastruktur gewandelt (stellvertretend: DWA 2016). Als Folge der zumeist pachtbasierten Ausweitung von Betriebsflächen liegen landwirtschaftliche Parzellen zunehmend verstreut und in größerer Entfernung zur jeweiligen Hofstelle (stellvertretend: Süß 2014). In der Literatur ist häufig von steigenden Transportdistanzen die Rede (DWA 2016; Gutberlet 2012; Lehmigk-Emden 2012; Soboth 2012). Daneben sind mit der Ausweitung des Anbaus von Energiepflanzen insbesondere zur Biogaserzeugung zusätzliche und zudem transportintensive Fahrbeziehungen entstanden. Infolgedessen gewinnen daher markungs- bzw. gemeindeübergreifende Transportbeziehungen in der Landwirtschaft zunehmend an Bedeutung (Bromma 2014; Gockel 2010; Gutberlet 2012; H.-D. Meißner 2012; Soboth 2012).

Gleichzeitig werden die zur Bewirtschaftung eingesetzten Landmaschinen mit zunehmender Leistungsfähigkeit und Schlagkraft deutlich schwerer, größer und im Straßentransport auch schneller (Gutberlet 2012; Machl et al. 2016). Diese Entwicklung wird zusätzlich durch die zunehmend überbetriebliche Organisation der Bewirtschaftung verstärkt (DWA 2016; Gockel 2010; Kröhl 2012; H.-D. Meißner 2012). Traktoren und Arbeitsmaschinen mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 60 km/h, Außenbreiten von 3 m, Achslasten von 11,5 t und Transportgespanne mit einer Gesamtmasse von 40 t sind in der landwirtschaftlichen Praxis keine Seltenheit mehr. Immer häufiger werden zudem LKW für Zubring- und Abfuhrarbeiten eingesetzt und verdrängen dadurch klassische Traktor-Anhänger-Transportgespanne (Bernhardt et al. 2005; DWA 2016).

Angesichts veränderter Rahmenbedingungen ist das bestehende, ländliche Wegenetz vielerorts nicht (mehr) in der Lage, den veränderten Ansprüchen der Landwirtschaft gerecht zu werden (Machl et al. 2018; Moninger 2014; Soboth 2012). In zahlreichen Bundesländern werden daher seit einigen Jahren unterschiedliche Initiativen zur Förderung des Aus- und Aufbaus eines bedarfsgerechten, leistungsfähigen und zukunftsorientierten (Kern-)Wegesystems für die Landwirtschaft auf den Weg gebracht (stellvertretend: ALRSH et al. 2008a; Brunner 2014; Lehmigk-Emden 2012). Ziel dieser Initiativen ist der Aufbau eines überregionalen, raumfüllenden und durchgängigen Kernwegesystems. Dieses soll in entsprechender Ausbauqualität für eine weitmaschige und gemeindeübergreifende Vernetzung sorgen und dabei multifunktionalen Ansprüchen der Landwirtschaft, des Freizeitverkehrs oder des Tourismus gerecht werden (Bromma 2014; DWA 2016; Gockel 2012; Gutberlet 2012; Karmann 2005; Lehmigk-Emden 2012; H.-D. Meißner 2012; Soboth 2012). Das Wegesystem soll dabei einerseits die Erreichbarkeit landwirtschaftlicher Parzellen gewährleisten (Bertling et al. 2015; DWA 2016; Gutberlet 2012) und gleichzeitig andererseits eine Lenkungsfunction für den landwirtschaftlichen Transportverkehr übernehmen (ALRSH et al. 2008a; DWA 2016; Gutberlet 2012; Lehmigk-Emden 2012; Soboth 2012).

Ziel der 2014 in Bayern vom BayStMELF ins Leben gerufenen *Initiative Ländliche Kernwegetze* (Brunner 2014) ist neben einer Ertüchtigung des bestehenden Wegenetzes insbesondere der Aufbau eines bedarfsgerechten, überregional durchgängigen und multifunktional ausgelegten Kernwegesystems. Grundlage hierfür bildet die von der DWA herausgegebene *Richtlinie Ländlicher Wegebau* (RLW; DWA 2016). Kernwege (= Hauptwirtschaftswege) sollen demnach für Fahrbahnbreiten von mindestens 3,5 m, Transportgeschwindigkeiten von 50 km/h und Achslasten von 11,5 t ausgelegt sein und eine Tragfähigkeit für Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse von 40 t aufweisen. Der Aus- und Aufbau des landwirtschaftlichen Kernwegesystems soll vor dem Hintergrund einer Reduzierung der Flächeninanspruchnahme insbesondere auf bestehenden Trassen erfolgen. Im Rahmen der Umgestaltung soll zudem das bestehende Wegenetz ausgedünnt werden.

Das land- und forstwirtschaftliche Wegesystem in Bayern umfasst mit einer Länge von rund 300 000 km ca. 64 % der Gesamtlänge des bayerischen Verkehrsnetzes. Abbildung 103 zeigt die Längenanteile der verschiedenen Wegekategorien des bayerischen Wegenetzes. Da die bedarfsgerechte Aus- bzw. Umgestaltung des ländlichen Wegenetzes mit nicht unwesentlichen Kosten verbunden ist, sind - nicht zuletzt in Anbetracht der dargestellten Dimensionen - zeitliche und räumliche Prioritäten auf Grundlage objektiver Kriterien zu setzen (ALRSH et al. 2008a; Bromma 2014; Machl et al. 2019a, 2018).

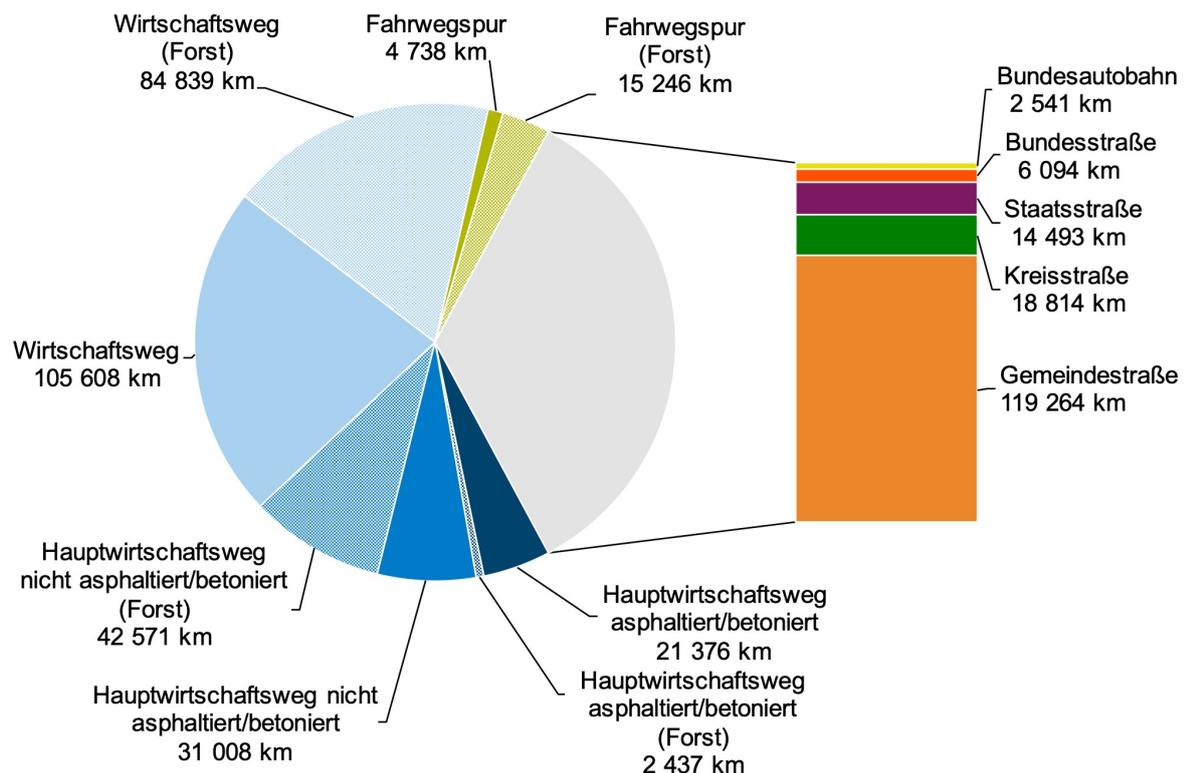


Abbildung 103: Längenanteile verschiedener Wegekategorien am bayerischen Verkehrsnetzes für das Jahr 2019 (Berechnungsgrundlage: ATKIS®-Verkehrsnetzes des LDBV); die Klassifikation von Forstwegen erfolgt durch räumliche Verschneidung der Verkehrswegachsen mit Objekten der ATKIS®-Objektart AX_Wald

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Erarbeitung und Erprobung neuartiger Planungsgrundlagen für die Konzeption bedarfsgerechter und interkommunaler Kernwegesysteme. Dazu sollen die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel 8 und 9 aufgegriffen und in neue Planungsgrundlagen überführt werden.

10.1 Verwandte Arbeiten

Neben dem baulichen Zustand und der Funktion von Wegen gilt insbesondere die Überrollungshäufigkeit bzw. die an Einzelsegmente angebundene Fläche als objektiver Indikator zur zeitlichen und räumlichen Priorisierung des Ausbaus von Wirtschaftswegen (ALRSH et al. 2008a; Bertling et al. 2015). Da diese Informationen für Projektgebiete in der Regel zunächst nicht vorliegen, sind entsprechende Angaben für einzelne Trassen bzw. Bestandteile des Wegenetzes mit großem Aufwand zu erheben (ALRSH et al. 2008b; Bertling et al. 2015). Informationen zur Verkehrsbedeutung einzelner Segmente werden dabei aus der Befragung von Landwirten (stellvertretend: ALRSH et al. 2008b) oder aber durch Expertenbeurteilung auf Basis der Lage von Betriebsstätten und zugehörigen Parzellen abgeschätzt (Bertling et al. 2015). Die Erhebung entsprechender Angaben ist mit enormem Aufwand verbunden (Bertling et al. 2015) und die gewonnenen Informationen sind zumeist nicht vollständig objektiv (ALRSH et al. 2008a). Da sich die Betrachtung zumeist auf Verfahrens- bzw. Projektgebiete beschränkt bleibt die überregionale Verbindungsfunktion einzelner Wegtrassen beispielsweise für den landwirtschaftlichen Transitverkehr außer Betracht (ALRSH et al. 2008a; Bertling et al. 2015).

Der von Machl et al. (2016, 2018) entwickelte Ansatz ermöglicht erstmals eine automatisierte, landesweit flächendeckende, realitätsnahe und gleichzeitig detailscharfe Berechnung von Hof-Feld-Transportpfaden (siehe hierzu auch Kapitel 8). Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind Grundlage dieses Kapitels.

10.2 Forschungsfragen

Hinsichtlich der Bereitstellung objektiver Planungsgrundlagen für die Konzeption interkommunaler Kernwegesysteme ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Wie lassen sich objektive und damit belastbare Angaben zur regionalen und überregionalen Bedeutung einzelner Wegabschnitte für den landwirtschaftlichen Verkehr ableiten?
2. An welchen Stellen können entsprechende Angaben in den Planungsprozess einfließen?
3. Wie ist es möglich, die Effekte einer Planung bereits in einer frühen Phase evaluieren und für die weitere Planung nutzen zu können?

10.3 Konzeptionelle Überlegungen zur Ableitung der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente

Neben der Möglichkeit zur detaillierten Beschreibung der Zusammensetzung einzelner Transportpfade (vgl. Abschnitt 8.5.2 bzw. 9.5.2) ermöglicht die kleinteilige Abbildung der Pfade in Form von Verweisen auf die jeweils beteiligten Elemente zudem eine detaillierte Betrachtung der an Einzelsegmente angeschlossenen landwirtschaftlichen Nutzfläche. Diese Fläche lässt sich zudem nach angebundenen Kulturarten differenzieren. Die an ein Straßen-segment angebundene landwirtschaftliche Nutzfläche wird im Folgenden als *Erschließungsfläche* eines Segments bezeichnet.

Zur Ermittlung der nach Kulturarten differenzierten Erschließungsfläche sind die Angaben zu den Flächeninhalten der angebundenen Parzellen auf Ebene einzelner Wegsegmente zu aggregieren. Abbildung 104 verdeutlicht das Prinzip anhand eines Beispiels. Gezeigt sind die Hof-Feld-Transportpfade zwischen der Hofstelle A und den zugehörigen Parzellen A₁ und A₂ sowie der Hofstelle B und der zugehörigen Parzelle B₁. Da sich die jeweiligen Pfade aus ihren Einzelbestandteilen in Form von Verweisen auf einzelne Objekte zusammensetzen, lässt sich über die Verweise auf identische Objekte die Erschließungsfläche durch Aggregation berechnen. Neben der an ein Segment angebotenen landwirtschaftlichen Gesamtnutzfläche lässt sich durch zusätzliche Aggregation nach Kulturarten die kulturartenspezifische Erschließungsfläche ermitteln.

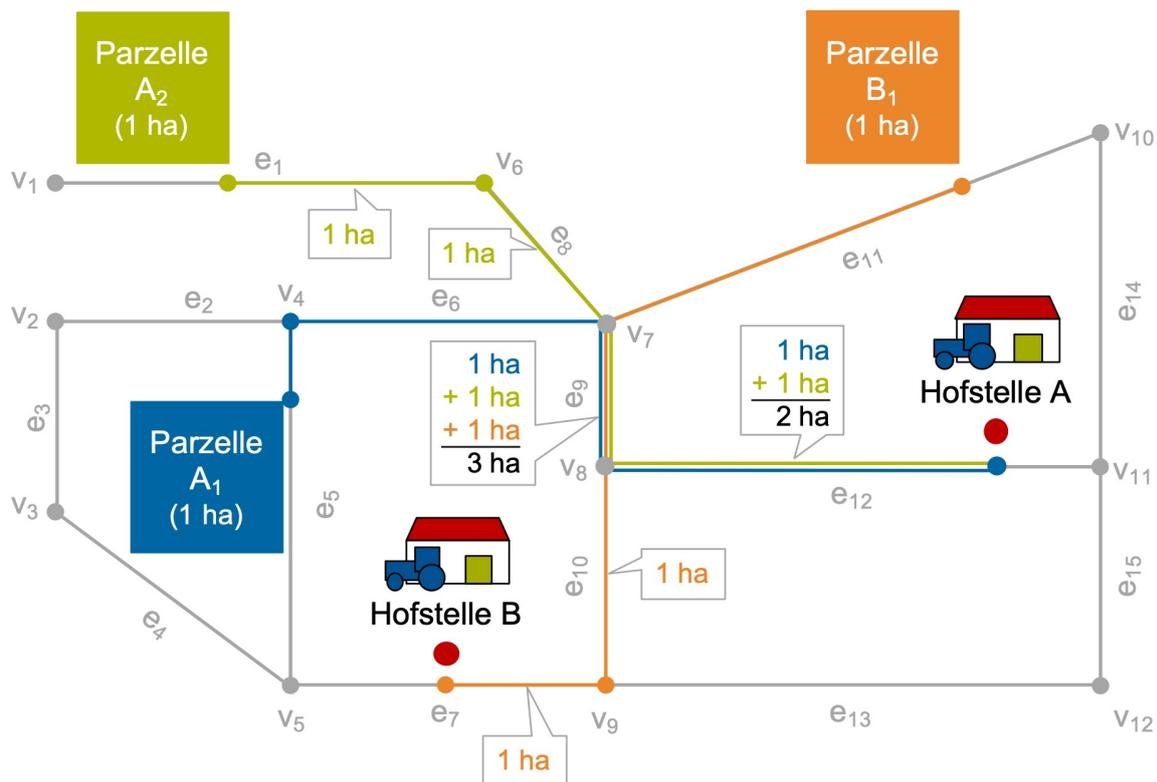


Abbildung 104: Schematische Darstellung der Ableitung von Erschließungsflächen aus Einzelpfaden; im Beispiel werden die Parzellen A₁ und A₂ von Hofstelle A und die Parzelle B₁ angefahren; die Erschließungsfläche einzelner Segmente ergibt sich durch Aufsummieren der Fläche angebundener Parzellen (nach Machl et al. 2018, verändert)

10.4 Ableitung der Erschließungsfläche für Einzelsegmente

Innerhalb des Informationssystems ist die Berechnung der Erschließungsflächen einzelner Wegsegmente über eine materialisierte Datenbanksicht abgebildet. Den einzelnen Segmenten des Wegenetzes werden dabei Angaben zur angebundenen Fläche, zu Art und Umfang der erschlossenen Kulturarten sowie Angaben zur Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe zugeordnet. Listing 20 zeigt den vereinfachten SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht *ConnectedAreaRoadSegment* für die Abbildung der Erschließungsfläche von Einzelsegmenten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind an dieser Stelle zeitliche Aspekte sowie auch die Bezeichnungen der Datenbankschemata nicht dargestellt.

Für die Ausgabe der benötigten Information sind die Segmente des Verkehrswegenetzes (Tabelle *RoadSegment*, Zeile 8) mit Angaben zur Erschließungsfläche einzelner Segmente (Zeilen 12 bis 38) und Angaben zur Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe (Zeilen 43 bis 46) zusammenzuführen. Zur Berechnung der über ein Segment erschlossenen landwirtschaftlichen Kulturen sind zunächst die Pfadbestandteile (Tabelle *pathComponent*) mit den landwirtschaftlichen Parzellen (Tabelle *AgriculturalParcel*) über entsprechende Fremdschlüsselbeziehungen zusammenzuführen (Zeilen 32 bis 34). Durch kulturartenspezifisches Aufsummieren der Schlagflächen (Attribut *cropArea*) und zählen der distinkten Objektidentifikatoren landwirtschaftlicher Parzellen (Attribut *oid*) ist es möglich, einzelnen Segmenten des Verkehrswegenetzes Angaben zur Flächensumme einzelner Kulturen (Zeilen 28 und 29) sowie zur Anzahl der Parzellen einer Kulturart (Zeilen 30 und 31) zuzuordnen. Die Aggregation hat dazu gruppiert nach Segment (Feld *idRoadSegment*) und Kulturart (Attribute *cropCode* und *cropName*) zu erfolgen (Zeilen 35 bis 37). Das Ergebnis dieser Aggregation lässt sich durch eine weitere Aggregationsstufe zusätzlich komprimieren, so dass im Ergebnis für ein Straßensegment ein Ergebnistupel resultiert (Zeilen 12 bis 38). Dazu werden die Angaben zur Fläche einzelner Kulturarten in einem komplexen Datentyp gebündelt und mit Hilfe der Funktion `array_agg()` in einem Array zusammengefasst (Zeilen 13 bis 16). Zusätzlich werden die Flächensummen sowie auch die Zahl der angebundenen Parzellen aufsummiert (Zeilen 18 und 19 bzw. 20 und 21). Die Aggregation erfolgt dabei gruppiert nach dem Feld *idRoadSegment* (Zeile 38).

Für die Berechnung der Anzahl von Betrieben, die ein Segment für die Anfahrt ihrer Parzellen nutzen, ist für einzelne Segmente die Anzahl distinkter Fremdschlüsselverweise auf die bewirtschaftenden Betriebe (Feld *idFarm*) der Pfadbestandteile (Tabelle *pathComponent*) zu berechnen (Zeilen 43 bis 47). Die Aggregation erfolgt dabei gruppiert nach dem Feld *idRoadSegment* (Zeile 47).

Die Angaben zur Erschließungsfläche und auch die Angaben zur Anzahl der Betriebe, die ein Segment nutzen, können jeweils über die Fremdschlüsselverweise auf Straßensegmente verknüpft werden. Das Ergebnis enthält sämtliche Felder der Tabelle *RoadSegment*, detaillierte Angaben zu Art und Fläche der angebundenen Kulturen (Attribute *connectedCropAreaList* bzw. *connectedArea*) sowie Informationen zur Anzahl angebundener Parzellen (Attribut *nParcelsSegment*) und Betriebe (*nFarmsSegment*).

```

1 CREATE MATERIALIZED VIEW "ConnectedAreaRoadSegment"
2 AS
3 SELECT "RoadSegment".*,
4         "connectedAreaSegment"."connectedCropAreaList",
5         "connectedAreaSegment"."connectedArea",
6         "connectedAreaSegment"."nParcelsSegment",
7         "nFarmsSegment"."nFarmsSegment"
8 FROM "RoadSegment" "RoadSegment"
9 LEFT JOIN
10      -- Aggregation der Erschließungsfläche für einzelne Segmente
11      -- des Verkehrswegenetzes
12      (SELECT "idRoadSegment",
13             array_agg( ROW(round("sumArea"),
14                            "cropName",
15                            "cropCode")
16                       ORDER BY "sumArea" DESC)
17             AS "connectedCropAreaList",
18             sum("sumAreaCrop")
19             AS "connectedArea",
20             sum("nParcelsCrop")
21             AS "nParcelsSegment"
22      FROM
23           -- Aggregation der über ein Wegsegment erschlossenen
24           -- landwirtschaftlichen Nutzfläche gruppiert nach Kulturart
25           (SELECT pc."idRoadSegment",
26                ap."cropCode",
27                ap."cropName",
28                sum(ap."cropArea")
29                AS "sumAreaCrop",
30                count(DISTINCT ap.oid)
31                AS "nParcelsCrop"
32           FROM "pathComponent" pc
33                JOIN "AgriculturalParcel" ap
34                ON ap."oid" = pc."idParcel"
35           GROUP BY pc."idRoadSegment",
36                    ap."cropCode",
37                    ap."cropName") "cropsSegment"
38           GROUP BY "idRoadSegment") "connectedAreaSegment"
39 ON "RoadSegment"."oid" = "connectedAreaSegment"."idRoadSegment"
40 LEFT JOIN
41      -- Berechnung der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe, die
42      -- ein Segment für die Anfahrt ihrer Parzellen nutzen
43      (SELECT pc."idRoadSegment",
44             count(DISTINCT pc."idFarm")
45             AS "nFarms"
46      FROM "pathComponent" pc
47           GROUP BY pc."idRoadSegment") "nFarmsSegment"
48 ON "RoadSegment"."oid" = "nFarmsSegment"."idRoadSegment";

```

Listing 20: SQL-Ausdruck zur Erzeugung der Datenbanksicht ConnectedAreaRoadSegment für die Berechnung der Erschließungsfläche einzelner Straßensegmente (vereinfacht)

Abbildung 105 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Datenbankabfrage für ein beispielhaft ausgewähltes Wegsegment. Da sich entsprechende Angaben für sämtliche Wegsegmente in Bayern ermitteln lassen, kann - wie in Abbildung 106 dargestellt - ein landesweites Monitoring der Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente durchgeführt werden. Die Abbildung zeigt die aus einzelnen Hof-Feld-Transportpfaden abgeleitete Erschließungsfläche für alle 3,2 Mio. Segmente des bayerischen Verkehrswegenetzes.

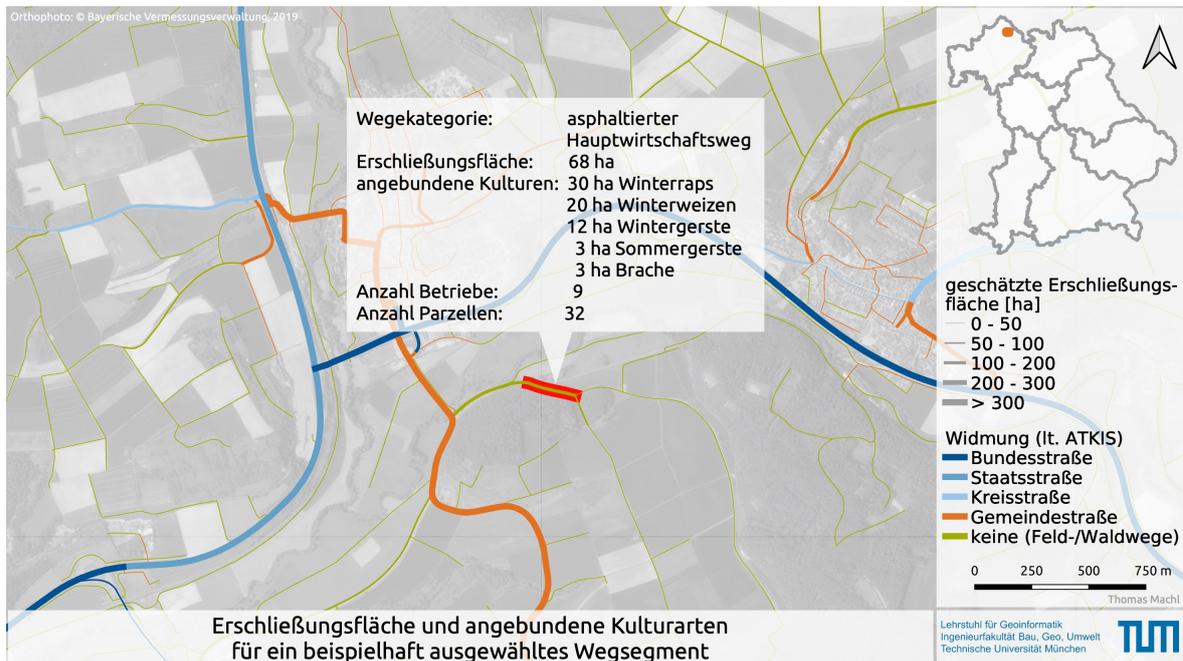


Abbildung 105: Ermittelte Erschließungsfläche und Fläche der angebundenen Kulturarten für ein beispielhaft ausgewähltes Wegsegment (Stichtag: 01.06.2018)

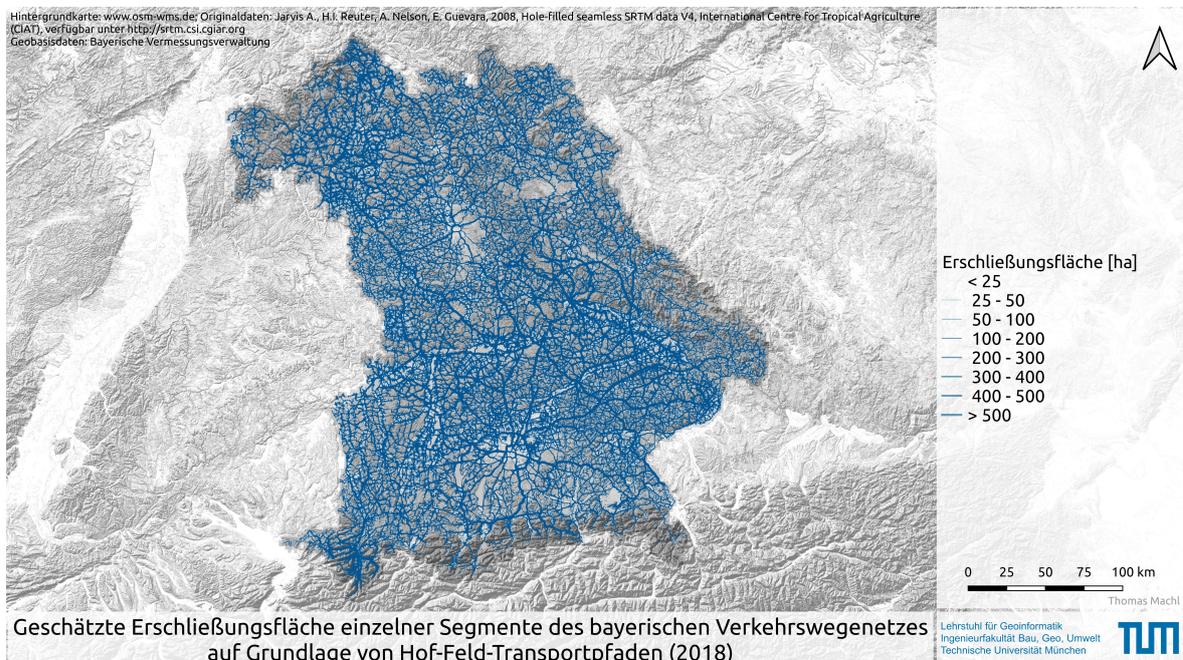


Abbildung 106: Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente des bayerischen Verkehrsnetzes abgeleitet aus Hof-Feld-Transportpfaden (Stichtag: 01.06.2018)

10.5 Evaluierung der Erschließungsfläche als Planungsgrundlage für die Konzeption von Kernwegesystemen

Um die möglichen Nutzenpotenziale der geschätzten Erschließungsfläche als neuartige Planungsgrundlage für die Konzeption interkommunaler Kernwegesysteme evaluieren zu können, fließen die Ergebnisse der Analysen im Rahmen des Modellprojekts *NES-Allianz* erstmals in einen realen Planungsprozess ein. Das Modellprojekt wird unter anderem von Astner (2017) begleitet. Die ILEK-Region NES-Allianz umfasst insgesamt 14 eigenständige Kommunen im Bereich der unterfränkischen Landkreise Rhön-Grabfeld bzw. Bad Kissingen. Das Gebiet sowie auch die beteiligten Kommunen sind in Abbildung 107 veranschaulicht. Im unmittelbaren Umfeld grenzen nach allen Raumrichtungen weitere ILEK-Regionen an.

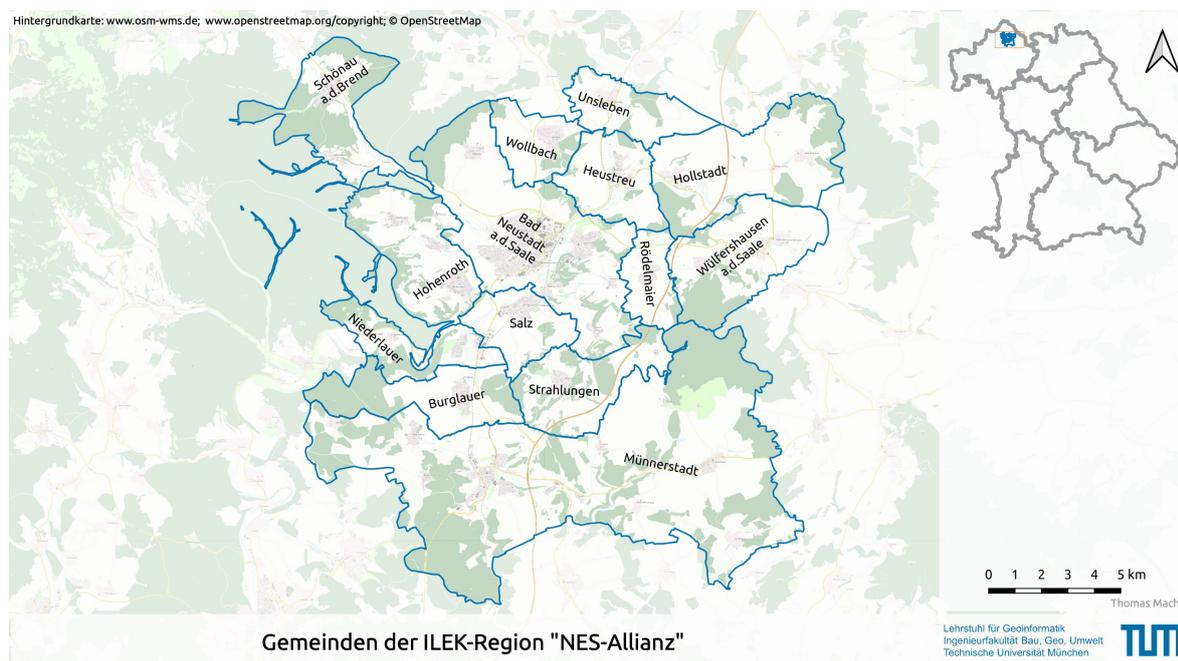


Abbildung 107: Beteiligte Kommunen der ILEK-Region NES-Allianz

Zur Evaluierung möglicher Nutzenpotenziale für die Konzeption von Kernwegesystemen werden dem beauftragten Planungsbüro die um Angaben zur geschätzten Erschließungsfläche angereicherten Wegsegmente des ATKIS[®]-Verkehrswegenetzes zur Verfügung gestellt. Die Daten enthalten für einzelne Segmente neben der aus Hof-Feld-Transportpfaden geschätzten Erschließungsfläche (Abbildung 108) auch Angaben zur Erschließungsfläche aus Pfaden zwischen Parzellen und dem überregionalen Verkehrswegenetz (Abbildung 109). Den aus Hof-Feld-Transportpfaden errechneten Erschließungsflächen liegen zusätzlich auch die Transportpfade zwischen Parzellen und den vier größeren Biogasanlagen im Bereich der NES-Allianz zu Grunde. Damit sind die wesentlichen regionalen wie überregionalen Transportbeziehungen in den Schätzungen berücksichtigt.

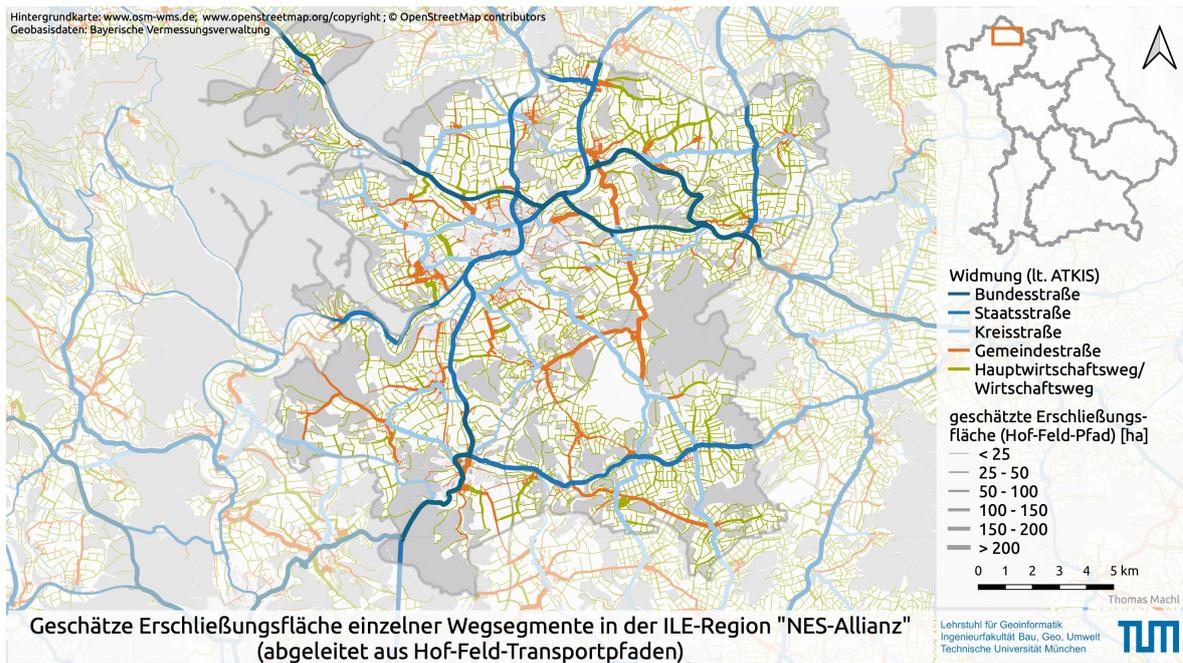


Abbildung 108: Visualisierung der aus Hof-Feld-Transportpfaden ermittelten Erschließungsfläche einzelner Segmente des ATKIS[®]-Verkehrswegenetzes (Stichtag: 01.06.2017)

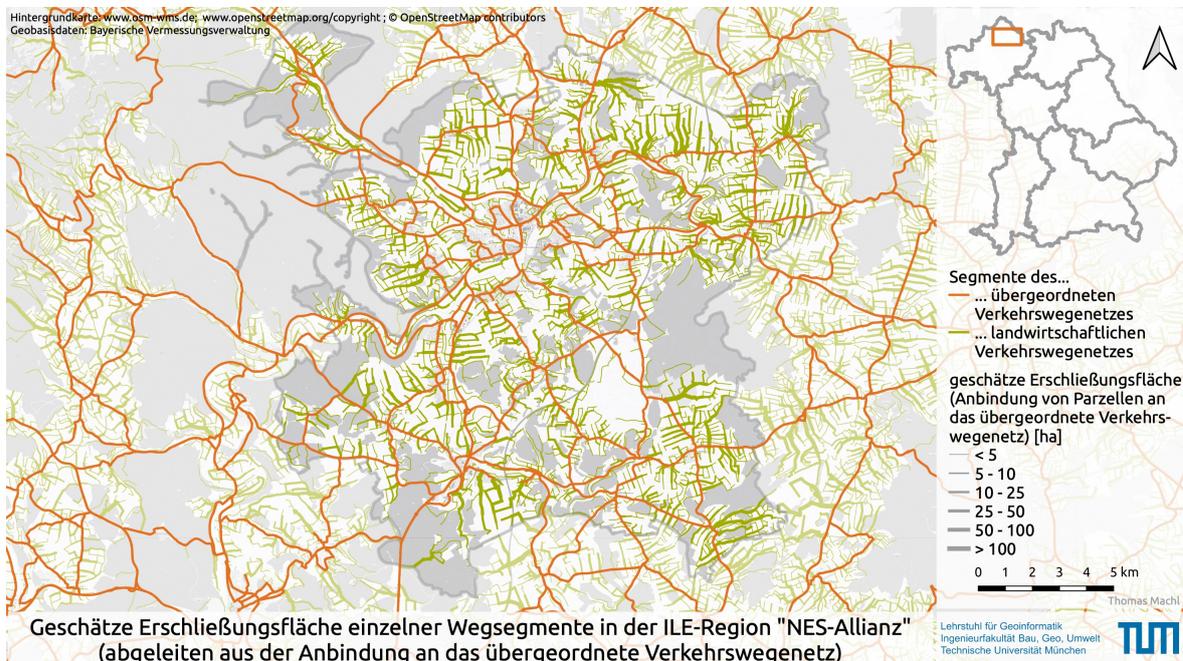


Abbildung 109: Visualisierung der aus Transportpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und dem überregionalen Verkehrsnetz ermittelten Erschließungsfläche einzelner Segmente des ATKIS[®]-Verkehrswegenetzes (Stichtag: 01.06.2017)

Für die Konzeption des Kernwegesystems ergeben sich aus der Perspektive des beauftragten Planungsbüros insbesondere folgende Nutzenpotentiale des neuartigen Indikators als zusätzliche Planungsgrundlage (siehe auch Astner 2017; Machl et al. 2019b, 2018):

- 1. Erkennung und Selektion von Haupt- und Nebenachsen des landwirtschaftlichen Transports:** Die geschätzte Erschließungsfläche bietet insbesondere in der Vorplanung eine objektive Grundlage für die Erkennung von Haupt- und Nebenachsen des landwirtschaftlichen Transportverkehrs. Dadurch lässt sich die Vor-Ort-Begutachtung von Wegtrassen sowie auch die Erfassung von Wegezuständen anhand belastbarer Kriterien planen und priorisieren. Gegenüber dem bisherigen Vorgehen, die benötigten Informationen zur Verkehrsbedeutung in aufwendigen Interviews mit Vertretern vor Ort zu erheben, ergeben sich deutliche Effizienzgewinne.
- 2. Objektivierung der Diskussion mit den Planungsbeteiligten:** Die Erarbeitung von Kernwegekonzepten erfolgt im unmittelbaren Dialog mit den Beteiligten vor Ort. Für die Diskussion mit den Planungsbeteiligten liegt nun erstmals eine objektive und belastbare Argumentationsgrundlage vor. Die Diskussion wird dadurch erheblich objektiviert.
- 3. Erleichterung der überregionalen Konzeption des Wegesystems:** Da die geschätzte Erschließungsfläche sowohl die lokale wie auch die überregionale Erschließungsfunktion einzelner Straßen- und Wegsegmente abbildet, wird die Detektion von Anschlussstellen zu Wegenetzen angrenzender Regionen erleichtert. Dadurch wird der Aufbau eines durchgängigen, geschlossenen und damit auch konsistenten Kernwegesystems vereinfacht.
- 4. Unterstützung in der zeitlichen und örtlichen Priorisierung des Trassenausbaus:** Die über einzelne Segmente erschlossene landwirtschaftliche Nutzfläche bildet - natürlich gemeinsam mit anderen Aspekten - eine objektive Grundlage für die zeitliche und örtliche Priorisierung des Ausbaus einzelner Teilabschnitte des Wegesystems.
- 5. Möglichkeit zur frühzeitigen Evaluierung von Planungsszenarien:** Der Erschließungsflächenberechnung liegen die mit Hilfe des in Abschnitt 8 beschriebenen Werkzeugs geschätzten Hof-Feld-Transportpfade zu Grunde. Neben einer Analyse des Ist-Zustands ermöglicht das Werkzeug auch eine Berechnung von Hof-Feld-Transportpfaden für verschiedene Planungsszenarien (= mögliche Zustände der Zukunft): Wie bereits in Abschnitt 8.4.3 dargestellt, werden zur Abbildung ungleicher Präferenzen für verschiedene Wegekategorien und damit zur realitätsnahen Abschätzung von Transportrouten bei der Pfadberechnung Gewichtungsfaktoren eingeführt. Mit Hilfe dieser Gewichtungsfaktoren ist es sowohl möglich, für verschiedene Planungsszenarien einzelne Wege bzw. Wegtrassen „virtuell zu ertüchtigen“ (= Senkung der Kantengewichte bzw. der Gewichtungsfaktoren) oder aber aus dem Wegenetz zu entfernen (= unendlich hohe Kantengewichte). Die Analysen lassen sich nun für Planungsszenarios wiederholen, wodurch sich die Veränderungen der Erschließungsfläche für einzelne Wegsegmente ceteris paribus ermitteln lassen. Die regionalen wie überregionalen Effekte einer Planungsalternative lassen sich somit bereits in einer frühen Planungsphase abschätzen und mit Beteiligten diskutieren.

Im Rahmen des Modellprojekts werden die Effekte mehrerer Planungsalternativen auf die Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente abgeschätzt. Für das Planungsbüro liefern die Ergebnisse dieser Schätzungen wertvolle Aufschlüsse zu möglichen Effekten verschiedener Szenarien.

10.6 Diskussion des entwickelten Ansatzes

Die Erschließungsfläche gibt erstmals detaillierte Auskunft über die Bedeutung einzelner Segmente des Verkehrswebsites für den landwirtschaftlichen Verkehr. Dabei stützt sich die Abschätzung auf tatsächliche Transportbeziehungen zwischen Hofstellen und landwirtschaftlichen Parzellen. Die Angaben zur Erschließungsfläche einzelner Segmente lassen sich aufgrund der kleinteiligen Abbildung der Pfade unmittelbar und einfach aus Hof-Feld-Transportrouten ableiten. Die Güte der Angaben zur Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente ergibt sich dadurch unmittelbar aus der Qualität der in Kapitel 8 beschriebenen Abschätzung des Routenverlaufs zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und den jeweiligen Hofstellen. Der beobachtete hohe Übereinstimmungsgrad zwischen tatsächlichen und geschätzten Pfaden (siehe Kapitel 8.6) lässt auch für die ermittelten Erschließungsflächen ein hohes Qualitätsniveau erwarten.

Für die Konzeption ländlicher Kernwegesysteme liefert die geschätzte Erschließungsfläche eine wertvolle Planungsgrundlage zur Selektion von Haupt- und Nebenachsen des landwirtschaftlichen Transportverkehrs und gibt Hinweise für die bedarfsgerechte Ausgestaltung sowie für die zeitliche Priorisierung des Ausbaus einzelner Trassen. Entsprechende Informationen waren zuvor für Projekt- bzw. Verfahrensgebiete nicht verfügbar und waren daher durch aufwendige Befragung bzw. Experteneinschätzung zu ermitteln. Die Erhebung entsprechender Informationen war zuvor mit hohem Personal- und Zeitaufwand verbunden (vgl. ALRSH et al. 2008a; Bertling et al. 2015). Gleichzeitig waren die über Befragungen oder Experteneinschätzung gewonnenen Angaben zumeist unvollständig, ausschließlich auf Projektgebiete beschränkt und nicht immer absolut objektiv (vgl. ALRSH et al. 2008a).

Mit Hilfe des neuen Ansatzes zur Ableitung der Erschließungsfläche aus Hof-Feld-Transportpfaden lassen sich für die Planung erstmals weitestgehend automatisiert objektive, belastbare und detaillierte Angaben zur Relevanz einzelner Segmente des Verkehrswebsites bereitstellen. Der entwickelte Ansatz berücksichtigt regionale wie auch überregionale Transportbeziehungen und ermöglicht für die Planung eine umfassende Sicht auf die (trans-)regionalen Transportströme in der Landwirtschaft. Damit liefert die Erschließungsfläche als zusätzliche Planungsgrundlage wertvolle Aufschlüsse zur Rolle einzelner Segmente innerhalb des Wegesystems, welche die Konzeption eines durchgängigen Kernwegesystems deutlich vereinfachen können. Für eine umfassende Sicht sind - wie auch im Modellprojekt NES-Allianz geschehen - neben den Hof-Feld-Transportbeziehungen auch die Transportbeziehungen zwischen Parzellen und zentralen Sammelstellen wie Biogasanlagen zu berücksichtigen.

Als Indikator ermöglicht die Erschließungsfläche eine Vereinfachung, Beschleunigung und Objektivierung des Planungsprozesses. Dies betrifft die Vorplanung, die Konzeption, die Diskussion mit den Planungsbeteiligten wie auch die Bewertung von Planungsalternativen.

Als Indikator liefert die Erschließungsfläche allerdings lediglich eine Momentaufnahme. Steigende bzw. anhaltend hohe Pachtquoten von 60 % für die *Bundesrepublik Deutschland* (BRD) (BMEL 2015) oder 48 % für Bayern (BayStMELF 2016), Veränderungen der Produktionsausrichtung oder das Betriebsgrößenwachstum bedingen Veränderungen über die Zeit, was sich auch auf die langfristige Aussagekraft der Angaben auswirkt. Aufgrund der fast vollständigen Automatisierung der Berechnungswerkzeuge lassen sich die Analysen mit hoher zeitlicher Auflösung (beispielsweise jährlich) wiederholen. Auch lassen sich mit Hilfe des Werkzeugs analog zu einer Analyse eines Ist-Zustands auch mögliche Zustände der

Zukunft analysieren, welche sowohl das Ergebnis einer Planung wie auch einer Prognose sein können.

Eine deutlich höhere zeitliche Stabilität zeigt insbesondere die aus der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrsnetz abgeleitete Erschließungsfläche. Diese ist unabhängig von Hof-Feld-Transportbeziehungen und lediglich beeinflusst vom bestehenden Wegenetz und der Lage landwirtschaftlicher Parzellen. Als Indikator gibt diese Erschließungsfläche Auskunft über die Flächensumme der landwirtschaftlichen Parzellen, die über ein Segment des landwirtschaftlichen Wegenetzes mit dem überregionalen Verkehrsnetz verbunden ist, und bietet damit eine komplementäre Sicht auf die Bedeutung einzelner Wegsegmente innerhalb des Verkehrswegenetzes.

Sämtliche Analysen stützen sich auf bundesweit verfügbare Geo- und Geobasisdaten des InVeKoS bzw. des ATKIS[®], wodurch sich die entwickelten Konzepte und Methoden unmittelbar auf andere Bundesländer übertragen lassen. Die Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte und Methoden wurde im Kontext des Projekts LandModell^{TUM} bereits erfolgreich für das Bundesland Hessen demonstriert.

10.7 Ausblick

Entsprechend dem Ansatz eines Geodesign-Prozesses (vgl. Steinitz 2012) ist es möglich, einzelne Wege oder Wegtrassen virtuell zu ertüchtigen, aus dem Netzwerk zu entfernen oder in dieses einzufügen und anschließend *ceteris paribus* die Effekte des Aus- bzw. Rückbaus von Wegen auf die Lenkung des landwirtschaftlichen Transportverkehrs bereits in einer frühen Planungsphase abzuschätzen und mit den Planungsbeteiligten zu diskutieren. Im Rahmen des Modellprojekts werden bereits mit Hilfe der entwickelten Werkzeuge verschiedene Planungsalternativen evaluiert und in den Planungsprozess eingebracht. Die Veränderungen am Verkehrswegenetz beschränken sich dabei jedoch auf die virtuelle Ertüchtigung und das Entfernen von Segmenten des Wegenetzes. Werden in das Verkehrsnetz zusätzliche Segmente eingebracht, so bedingt dies eine Veränderung der Netztopologie, was wiederum ein umfassenderes Framework für das topologisch konsistente Editieren des Netzwerks erfordert. Dieser Aspekt ist bislang nicht Bestandteil der Betrachtungen und sollte daher in weiterführenden Arbeiten behandelt werden. Erste konzeptuelle Überlegungen hierzu sowie auch eine erste prototypische Implementierung im Zusammenhang mit dem LandModell^{TUM} finden sich in Hagspiel (2016).

Im Kontext des Geodesigns stellt die geschätzte Erschließungsfläche lediglich eine Sicht auf die Evaluierung von Planungsalternativen dar. Daneben sollten in künftigen Arbeiten weitere ökonomische, ökologische und gesellschaftlich-kulturelle Gesichtspunkte für die Bewertung und Gegenüberstellung von Planungsalternativen herangezogen werden. Beispielhaft für solche komplementären Aspekte sind Ausbaurkosten, Flächeninanspruchnahme, Kompensationsbedarfe, potentielle Nutzungskonflikte oder aber die Effekte der Netzgestaltung auf den Wasserabfluss über begleitende Wegseitengraben. Konzeptionelle Überlegungen und erste Implementierungen finden sich im Kontext des LandModell^{TUM} in Gapp (2018).

Als Planungsgrundlage wurde bislang lediglich die gesamte, an ein Wegsegment angebundene landwirtschaftliche Nutzfläche herangezogen. Die im LandModell^{TUM} realisierte, kleinteilige Abbildung der Transportpfade in Form von Verweisen auf die beteiligten Objekte liefert jedoch auch detaillierte Angaben zum flächenmäßigen Umfang der an ein Wegseg-

ment angebundenen Kulturarten. Auf Grundlage dieser Information könnten sich in weiterführenden Arbeiten durch Definition von kulturartenspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen bzw. Standardarbeitsverfahren auch jahreszeitlich differenzierte Angaben zur Beanspruchung einzelner Wegsegmente durch landwirtschaftliche Fahrzeuge ableiten lassen. H.-D. Meißner (2012) oder ALRSH et al. (2008a) sehen entsprechende Angaben als grundlegende Eingangsinformation für den bedarfsgerechten Ausbau des Wegenetzes. Im Kontext des LandModell^{TUM} realisiert Gerl (2018) bereits eine erste, prototypische Implementierung zur Abschätzung der jahreszeitlichen Beanspruchung einzelner Wegsegmente durch den landwirtschaftlichen Verkehr.

Teil III

Schlussbetrachtungen und Ausblick

11 Zusammenfassung

Die grundsätzliche Intention des LandModell^{TUM} besteht im Aufbau eines raumzeitlichen, skalenübergreifenden und zunächst anwendungsneutralen Monitoringsystems für eine fortlaufende, landesweite Betrachtung verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft einschließlich der zeitlichen Entwicklung ihrer Bestandteile. Dabei setzt sich das LandModell^{TUM} zusammen aus den drei Hauptkomponenten *konzeptionelles Datenmodell* (Kapitel 4), *Informationssystem* (Kapitel 5) sowie einem *Werkzeugkasten* mit Methoden zur Analyse verschiedener Aspekte der Kulturlandschaft (Teil II). Den Kern des Monitoringsystems bildet ein zunächst anwendungsunabhängiges, raumzeitliches Informationsmodell, welches grundlegende Komponenten der Kulturlandschaft mit Relevanz für verschiedene Fachbereiche abbildet. Eine grundlegende Aufgabe des Informationsmodells liegt in der Herstellung eines gemeinsamen, fachdisziplinenübergreifenden Verständnisses der räumlich-semantischen Komponenten der Kulturlandschaft und ihrer Beziehungen zueinander. Das Informationsmodell wie auch dessen Implementierung in einem Informationssystem versteht sich dabei insbesondere als Plattform zur Fusion von Informationen verschiedener Fachdisziplinen. Sämtliche im Modell abgebildeten Elemente werden dabei als stabile Bezugsobjekte betrachtet, welche sich um Fachinformationen verschiedener Disziplinen anreichern lassen. Über den gemeinsamen Bezug von Information verschiedener Fachdisziplinen auf identische und jeweils kleinstmögliche, räumlich-semantische Einheiten wird eine integrierte und interdisziplinäre Betrachtung verschiedener räumlicher wie zeitlicher Phänomene der Kulturlandschaft deutlich vereinfacht. Solch integrierte Betrachtungen konnten im Rahmen dieser Arbeit bereits im praktischen Einsatz und anhand verschiedener Anwendungsfälle erfolgreich demonstriert werden (siehe Abschnitt II).

Auf konzeptueller Ebene wird das objektorientierte Datenmodell mit Hilfe der Modellierungssprache UML und unter Beachtung internationaler Normen der ISO 191xx Normenfamilie beschrieben. Dadurch ermöglicht das Informationsmodell ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen Datenhaltungs-, Bereitstellungs- und Visualisierungskomponenten aus dem Bereich der Geoinformatik sowie den Analysemethoden unterschiedlicher Fachdisziplinen. Aufgrund der klaren semantischen Definition von Objekten, Eigenschaften, Beziehungen und Aggregationshierarchien sowie aufgrund der Konformität zu internationalen Normen stellt das semantische Modell eine formal beschriebene und damit maschineninterpretierbare Grundlage für die Entwicklung komplexer Werkzeuge zur Analyse verschiedenster Aspekte der Kulturlandschaft dar.

Für die Konzeption des Informationsmodells werden erfolgreiche Konzepte des internationalen OGC[®] Standards CityGML zur semantischen Beschreibung dreidimensionaler 3D Stadt- und Landschaftsmodelle aufgegriffen. Hierzu zählen insbesondere der modulare Aufbau, die räumlich-semantisch kohärente Modellierung von Objekten, das grundlegende Konzept der Erweiterbarkeit um zusätzliche Objektarten und Attribute, das Konzept der semantischen Anreicherung sowie auch die Möglichkeit zur Ausbildung von Referenzen auf Information externer Datenquellen und -bestände.

Das Informationsmodell ist modular aufgebaut und untergliedert sich im derzeitigen Ausbaustand in ein Kernmodul, zehn thematische Pakete und zwei zusätzliche Module. Grundlegende Konzepte mit unmittelbarer Relevanz für die einzelnen Objektarten des Modells sind dabei im Kernmodul abgebildet.

Bei der Ausgestaltung des Modells liegt ein wesentliches Augenmerk auf der expliziten und umfassenden Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Fortentwicklung der Kulturlandschaft bzw. ihrer Bestandteile. Das dem LandModell^{TUM} zugrundeliegende Informationsmodell sieht daher bereits im Kern eine umfassende Abbildung der Zeit als wesentliche Dimension von Geoobjekten vor (siehe Abschnitt 4.3). Neben Objektlebensdauern und zeitlich begrenzt gültigen Beziehungen zwischen einzelnen Elementen sind insbesondere auch Zustandsveränderungen einzelner Objekte über die Zeit sowie auch objektübergreifende Übergangsbeziehungen explizit im Datenmodell abgebildet. Damit sind diese Aspekte unmittelbar für weiterführende Analysen und tiefergehende Betrachtungen zugänglich.

Im Gegensatz zu den Historisierungsansätzen bestehender Informationsmodelle zur Abbildung von Geoinformation, welche eine Versionierung - sofern diese überhaupt Bestandteil des Modells ist - über vollständige Objektkopien realisieren, sieht das LandModell^{TUM} die Historisierung von Objektzuständen über eine Versionierung von Attributzuständen vor. Die Attribute von Objekten des LandModell^{TUM} lassen sich zu diesem Zweck in Form von Attributzeitreihen mit Gültigkeitszeitintervallen der jeweiligen Attributzustände im Modell abbilden. Entsprechend diesem Ansatz ergibt sich der Zustand eines Realweltausschnitts einerseits aus den Objekten, deren Lebenszeitintervall zum entsprechenden Zeitpunkt Gültigkeit besitzt, und andererseits aus den Zuständen der jeweiligen Attribute im betrachteten Moment. Aus der gewählten Form der Abbildung ergeben sich insgesamt vier wesentliche Vorteile: Zum einen werden dadurch unveränderte Attributzustände in Objektversionen nicht redundant im Modell abgebildet. Zweitens erhöht sich durch diesen Ansatz die zeitliche Stabilität von Objekten, da nicht objektbildende Zustandsveränderungen nicht zu neuen Objekten oder Objektversionen führen. Die im Modell abgebildeten Objekte lassen sich dadurch über einen längeren Zeitraum als Referenzpunkt zur Anreicherung um interdisziplinäre Information nutzen. Drittens lassen sich bestehende Objekte einfach um zusätzliche Attributzeitreihen mit Information unterschiedlicher Fachdisziplinen erweitern, da Zustandsveränderungen eines Attributs unabhängig von der Versionierung von Objekten sind. Viertens sind Zustandsveränderungen unmittelbar für Zeitreihenanalysen zugänglich, da die einzelnen Attribute bereits in Form von Zeitreihen vorliegen.

Eine grundlegende Anforderung bei der Konzeption des LandModell^{TUM} als Kern des Monitoringsystems besteht zudem in der Erfassung und Dokumentation der zeitlichen Entwicklung einzelner räumlich-semantischer Einheiten einschließlich der Abbildung und semantischen Beschreibung von objekt- und objektartenübergreifenden Übergangsbeziehungen. Auch dieser Aspekt ist bereits im Kern des Informationsmodells verankert. Zur expliziten Abbildung entsprechender Übergangsbeziehungen dient im LandModell^{TUM} eine Graphstruktur, welche einzelne Objekte als Knoten und die zeitlichen Übergänge zwischen Objekten in Form von Kanten erfasst. Den Kanten bzw. Übergangsbeziehungen sind im LandModell^{TUM} umfassende Attribute zur semantisch detaillierten Beschreibung von Übergangsereignissen zugeordnet. Neben Angaben zu Zeitpunkt und Art eines Übergangs zwischen Objekten über die Zeit verfügen die Kanten zudem über eine semantisch wie geometrisch kleinteilige Beschreibung des zeitlichen Schicksals einzelner Geometriefragmente zum Zeitpunkt des Übergangs. Diese Form der Abbildung ermöglicht eine detaillierte Charakterisierung und Analyse der Reallokation einzelner Geometriefragmente.

Die Abbildung der Dimension Zeit lässt sich damit wie folgt zusammenfassen: Im LandModell^{TUM} verfügen neben den Objekten auch deren Eigenschaften und Beziehungen sowie auch Aggregations- und Kompositionsbeziehungen zwischen Objekten über Gültigkeitszeitintervalle. Dadurch wird einerseits eine umfassende Beschreibung von Objektzuständen und Konstellationen sowie andererseits eine detaillierte Betrachtung von Zustands- und Konstellationsveränderungen möglich. Die Abbildung von Zuständen und Zustandsveränderungen wird ergänzt durch eine kleinteilige, semantisch differenzierte Beschreibung von objekt- und objektartenübergreifenden Übergängen. Aufgrund der expliziten Abbildung dieser drei zeitlichen Aspekte im Modell sind sämtliche Informationen für weiterführende Analysen zugänglich.

Die thematische Ausgestaltung der Pakete und Klassen umfasst im aktuellen Ausbaustand neben der landwirtschaftlichen Flächennutzung auch die Aspekte Siedlungs-, Verkehrs-, Gewässer und Vegetationsflächen sowie auch Eigentumsgrenzen (Flurstücke). Dabei orientiert sich die semantische Differenzierung der im Datenmodell abgebildeten, thematischen Klassen an bestehenden Informationsmodellen zur Abbildung der Kulturlandschaft. Als Vorbild für die Auswahl thematischer Klassen dienen neben den Konzeptvorschlägen zur Ausgestaltung des LPIS-Informationsmodells, der INSPIRE-Richtlinie insbesondere auch die AAA[®]-Datenmodelle. Die Kulturlandschaft ist im Informationsmodell mehrfach repräsentiert. So zerfällt ein Landschaftsausschnitt semantisch einerseits in Eigentums- sowie andererseits in Bewirtschaftungseinheiten, welche zumeist eine unterschiedliche geometrische Ausdehnung aufweisen. Hinzu kommen räumlich-semantische Einheiten, welche unterschiedliche Formen einer Nutzung der Erdoberfläche repräsentieren. Ein wesentlicher Grundgedanke des LandModell^{TUM} liegt in einer Erweiterbarkeit des Modells, so dass die abgebildeten Objektarten lediglich als Kernkomponenten der Kulturlandschaft zu betrachten sind.

Im derzeitigen Ausbaustand umfasst das Informationsmodell dreizehn Pakete, wovon zehn Pakete thematische Aspekte und drei Pakete grundlegende Modellierungsaspekte behandeln. Die zehn thematischen Pakete beinhalten insgesamt mehr als 40 thematische Objektarten, welche jeweils über bis zu zwanzig Attribute je Klasse verfügen. Hinzu kommen noch zehn Klassen zur Abbildung grundlegender Aspekte wie beispielsweise der Modellierung von Objektlebensdauern, Attributzeitreihen oder der expliziten Abbildung objektübergreifender Übergangsbeziehungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die Implementierung des objektorientierten Informationsmodells innerhalb des objektrelationalen DBMS PostgreSQL/PostGIS (Abschnitt 5). Bei der Abbildung des objektorientierten Informationsmodells auf das objektrelationale Datenbanksystem werden die objektorientierten Konzepte weitestgehend übernommen oder anhand definierter Abbildungsregeln nachgebildet. Gleichzeitig besteht der grundlegende Anspruch bei der Übertragung des konzeptionellen Datenmodells auf die objektrelationale Struktur des Datenbanksystems darin, die Semantik des Modells in einer menscheninterpretierbaren Form aufrechtzuerhalten. Entsprechend werden Pakete, Klassen, Attribute, Attributzeitreihen, Vererbungen sowie auch zeitlich begrenzt gültige Beziehungen oder Aggregations- bzw. Kompositionshierarchien anhand definierter Abbildungsregeln in die objektrelationale Struktur des DBMS überführt. Zur Gewährleistung der Konsistenz sind dabei sämtliche Fremdschlüsselverweise datenbankseitig über entsprechende Constraints abgesichert. Für den einfachen und schnellen Zugriff auf die verschiedenen, im Datenbanksystem abgebildeten Objektarten und Statistiken sind datenbankseitig umfassende Datenbanksichten angelegt, mit deren Hilfe sich die Objektzustände zu beliebigen Zeitpunkten der Vergangenheit rekonstruieren und ausgeben lassen. Die Sichten liefern die Datensätze in einer

Struktur zurück, welche sich unmittelbar in gängige Geoinformationssysteme einbinden und weiterverarbeiten lässt.

Für den Aufbau des Informationssystems dienen jährliche Zeitscheiben landesweit flächendeckend verfügbarer Geodatenbestände unterschiedlicher Quellen für die Jahre 2010 bis 2018. Das Informationssystem ist dabei jedoch grundsätzlich für ein fortlaufendes Monitoring ausgelegt. Als Datenquellen seien an dieser Stelle neben den InVeKoS-Geodatenbeständen zur landwirtschaftlichen Flächennutzung der Bayerischen Landwirtschaftsverwaltung insbesondere auch Geodatenbestände der Bayerischen Vermessungsverwaltung unter anderem zu den Objektartengruppen der Tatsächlichen Nutzung, zu Flurstücken (ALKIS[®]) oder aber zum Verkehrswegenetz (ATKIS[®]) benannt. Eine ausführliche Darstellung der genutzten Datenquellen findet sich in Abschnitt 5.4.

Hinsichtlich der Datenintegration in das LandModell^{TUM}-Informationssystem besteht eine grundsätzliche Herausforderung in der Notwendigkeit, Objektlebensdauern, Zustandsveränderungen, objektübergreifende Übergänge, zeitlich begrenzt gültige Assoziationen sowie auch Aggregations- und Kompositionshierarchien zwischen Objekten aus Sequenzen von Schnappschüssen heterogener Datenbestände ableiten zu müssen. Die Werkzeuge zur Integration der verschiedenen Objektarten sind jeweils als ETL-Prozesse implementiert (Abschnitt 6). Mit Hilfe dieser Werkzeuge lassen sich die Zustände von bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten und Beziehungen mit den Zuständen und Konstellationen zu integrierender Schnappschusses abgleichen, Veränderungen feststellen und im Informationssystem dokumentieren. Auf Grundlage von zuvor festgelegten Objektbildungsregeln sucht das Werkzeug zunächst nach bereits im Informationssystem abgebildeten Objekten und gleicht anschließend Zustände bzw. Zustandsveränderungen ab. Sämtliche Veränderungen sowie auch objektübergreifende Übergänge werden innerhalb der ETL-Prozesse analysiert, klassifiziert und im Informationssystem dokumentiert, wo diese für weiterführende Analysen zur Verfügung stehen. Für die Suche nach identischen Objekten lassen sich nutzerdefinierbare Toleranzbereiche für zulässige geometrische Abweichungen zwischen zwei als identisch zu klassifizierenden Geoobjekten festlegen. Mit Hilfe dieses Ansatzes lässt sich die zeitliche Stabilität von Objekten deutlich erhöhen, wodurch die Eignung der Objekte als Bezugspunkt für die Anreicherung um zusätzliche Information verbessert wird. Die Geometrie räumlich-semantischer Objekte wird dabei als ebenso versionierbares Attribut betrachtet, wie es bei thematischen Attributen der Fall ist. Werden also Objekte innerhalb des geometrischen Toleranzbereichs als identisch erkannt, obwohl die Geometrie nicht vollständig identisch ist, so erfolgt eine Versionierung der Objektgeometrie im Informationssystem. Zum Stichtag 31.12.2018 besitzen im Informationssystem mehr als 26 Mio. Objekte zeitliche Gültigkeit.

Neben dem Informationsmodell und dem daraus abgeleiteten Datenbanksystem bildet eine Sammlung von Werkzeugen, das sog. LandAnalyticsToolkit^{TUM}, die dritte Hauptkomponente des entwickelten Monitoringsystems. Ein grundsätzliches Konzept des Monitoringsystems besteht in der unmittelbaren Kopplung des Informationsmodells mit Analysewerkzeugen, welche sich jeweils mit thematischen Teilaspekten der Kulturlandschaft auseinandersetzen. Die Werkzeuge greifen dabei auf die im Modell abgebildeten Einzelobjekte zu, verarbeiten diese und führen jegliche der in den Analysen gewonnenen Informationen zurück zu den betreffenden Objekten. Aufgrund dieses Konzepts der semantischen Anreicherung von Objekten stehen sämtliche Ergebnisse der durchgeführten Analysen weiterführenden Betrachtungen zur Verfügung. Die Abbildung der Ergebnisse erfolgt kleinteilig und in Form von Referenzen auf die jeweils kleinste, räumlich-semantische Einheit.

Auf Grundlage des LandModell^{TUM} werden in dieser Arbeit insgesamt fünf Werkzeuge zur landesweiten Betrachtung folgender Aspekte realisiert:

1. Werkzeug zur zeitlich rückwärtigen Ableitung von Lebensdauern, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen zwischen Objekten über die Zeit aus Abfolgen von jährlichen Schnappschüssen unterschiedlicher Datenbestände einschließlich der Dokumentation von Veränderungsereignissen (Abschnitt 6)
2. Werkzeug zur parametrischen Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen (Abschnitt 7)
3. Werkzeug zur Ableitung von Transportpfaden zwischen landwirtschaftlichen Parzellen und Hofstellen (Abschnitt 8)
4. Werkzeug zur Analyse und Bewertung der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das überregionale Verkehrsnetz (Abschnitt 9)
5. Werkzeug zur Ableitung der Erschließungsfläche einzelner Elemente des Verkehrsnetzes als Planungsgrundlage für die Konzeption bedarfsgerechter interkommunaler Kernwegesysteme für die Landwirtschaft (Abschnitt 10)

Sämtliche der in dieser Arbeit beschriebenen Werkzeuge liefern erstmalig landesweit flächendeckend und gleichzeitig einzelobjektbezogen detaillierte Angaben zu den jeweils betrachteten Aspekten. Gleichzeitig konnte in einer umfassenden Evaluierung eine sehr hohe Realitätsnähe der ermittelten Ergebnisse nachgewiesen werden.

Aufgrund der unmittelbaren Praxisrelevanz der erzielten Ergebnisse finden diese bereits Anwendung in verschiedenen Bereichen. So sei neben dem Einsatz der gewonnenen Informationen zur Erschließungsfläche einzelner Wegsegmente für die Konzeption interkommunaler Kernwegesysteme insbesondere auch die Nutzung der Erkenntnisse zur Verkehrsanbindung landwirtschaftlicher Parzellen als eine Facette der Abgrenzung benachteiligter Gebiete im Zuge der ELER-Förderung angeführt.

12 Erkenntnisse und wissenschaftliche Beiträge zur Forschung

Als Ergebnis des LandModell^{TUM} liegen neben dem raumzeitlichen Informationsmodell der Kulturlandschaft, dessen Implementierung in einem landesweiten Informationssystem sowie den entwickelten Konzepten und Methoden zur Abbildung und Analyse der Kulturlandschaft insbesondere auch die im Rahmen dieser Arbeit generierten, landesweit vorliegenden Informationen zu unterschiedlichen Aspekten der Kulturlandschaft vor. Die vorliegende Arbeit deckt dabei die vollständige Bandbreite von der Konzeption des semantischen Datenmodells über den Aufbau des landesweiten, raumzeitlichen und skalenübergreifenden Informationssystems, die Entwicklung und Umsetzung komplexer, einzelobjektbezogener und gleichzeitig landesweit flächendeckender Analysemethoden bis hin zu einem flächendeckenden, raumzeitlichen Monitoring im Sinne einer statistischen Betrachtung unterschiedlicher thematischer Fragestellungen ab. Dabei bewegt sich diese Arbeit an der Schnittstelle zwischen den Fachbereichen Geoinformatik, Landentwicklung sowie den Agrarwissenschaften. Bei der Bearbeitung der verschiedenen Fragestellungen spannt die Arbeit jeweils den Bogen von grundlegenden, wissenschaftlichen Betrachtungen bis hin zur Umsetzung der konzeptuellen Überlegungen in einer praktischen Implementierung bzw. Analyse. Aufgrund des interdisziplinären Charakters, der thematischen Breite und der fachlichen Tiefe leistet die vorliegende Arbeit an verschiedenen Stellen wissenschaftliche Beiträge in den genannten Fachdisziplinen. Die folgenden Abschnitte tragen die erzielten Ergebnisse noch einmal komprimiert zusammen und beleuchten dabei insbesondere die geleisteten, wissenschaftlichen Beiträge für die jeweiligen Fachbereiche.

12.1 Wissenschaftliche Beiträge im Forschungsbereich der Geoinformatik

Mit dem LandModell^{TUM} liegt ein skalenübergreifendes, raumzeitliches und zunächst anwendungsneutrales Informationsmodell der Kulturlandschaft einschließlich einer Umsetzung in einem datenbankbasierten Informationssystem vor. Das Informationsmodell - wie auch das hieraus abgeleitete Informationssystem - versteht sich dabei grundlegend als erweiterbare Plattform zur Fusion interdisziplinärer Information über den Bezug auf identische und stabile Objekte. In dieser Hinsicht unterscheidet sich das LandModell^{TUM} von bestehenden Informationsmodellen der Kulturlandschaft wie beispielsweise dem AAA[®]-Modell oder der INSPIRE-Richtlinie, welche sich ausschließlich auf die topographische bzw. teils auch topologische Beschreibung von geografischen Ausschnitten der Realwelt bzw. den interoperablen Austausch entsprechender Geoinformation fokussieren. Das LandModell^{TUM} folgt in dieser Hinsicht dem im Kontext des internationalen OGC[®]-Standards CityGML bereits erfolgreich praktizierten Konzept einer Nutzung des zunächst anwendungsneutralen Informationsmodells als Plattform zur Fusion von Fachinformationen unterschiedlicher Disziplinen

über den Bezug auf identische, räumlich-semantiche Objekte (stellvertretend: Kaden 2014; Moshrefzadeh et al. 2017).

Im LandModell^{TUM} erfolgt bereits im Kern des Informationsmodells eine umfassende und konsequente Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Evolution von räumlich-semantiche Komponenten der Kulturlandschaft. Neben der im Bereich der Geoinformatik bereits geläufigen Abbildung von Objektlebensdauern und zeitlich begrenzt gültigen Beziehungen zwischen Objekten ist im LandModell^{TUM} eine explizite und semantiche detaillierte Modellierung objektübergreifender Übergangsbeziehungen sowie auch eine Historisierung von Objektzuständen über eine Versionierung von Einzelattributen vorgesehen. Wenngleich sich in der Literatur bereits vereinzelt graphbasierte Ansätze zur Abbildung von zeitlichen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen finden (stellvertretend: Del Mondo et al. 2010; Thibaud et al. 2013), reicht der räumlich-semantiche Detaillierungsgrad der bestehenden Lösungen nicht umfänglich zur Beantwortung der in dieser Arbeit gestellten Forschungsfragen aus. Das im LandModell^{TUM} entwickelte Konzept greift den Grundgedanken einer Abbildung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen auf und erweitert diesen um eine räumlich wie semantiche detaillierte Beschreibung der Reallokation geometrischer Teilbereiche einzelner Geoobjekte. Damit geht der im LandModell^{TUM} entwickelte Ansatz deutlich über bestehende Konzepte hinaus. Die Historisierung von Objektzuständen erfolgt im LandModell^{TUM} über eine Versionierung von Attributzuständen. Entsprechend besitzen im LandModell neben den Objekten und Beziehungen auch Attributzustände jeweils über Lebenszeitintervalle. Objektzustände und -konstellationen ergeben sich folglich aus der Objektlebensdauer, den Gültigkeitszeitintervallen der jeweiligen Beziehungen sowie aus den Lebenszeitintervallen der einzelnen Attribute. Die grundsätzliche Idee einer Versionierung von Attributen wird auch bereits von Peuquet (2005) in Kontext der Modellierung von Geoinformation angediskutiert. Dieser Ansatz findet bislang noch nicht Einzug in bestehende Informationsmodelle bzw. -systeme. Innerhalb des LandModell^{TUM} sind sämtliche Attribute als versionierbar im Modell abgebildet. Damit geht der im LandModell^{TUM} verfolgte Ansatz über die Versionierungskonzepte bestehender Informationsmodelle hinaus, welche - sofern diese überhaupt über eine Versionierung von Zuständen verfügen - zumeist eine Historisierung von Objektzuständen in Form von vollständigen Kopien vorsehen (stellvertretend: AAA[®]-Modellierung). Die einzelattributbezogene Versionierung von Objektzuständen bietet neben der Möglichkeit zur redundanzfreien Abbildung von Attributzuständen und der Möglichkeit des unmittelbaren Zugriffs auf Attributzeitreihen insbesondere den Vorzug einer einfachen semantiche Anreicherung von Objekten um zusätzliche Information. Ursächlich hierfür ist insbesondere die Tatsache, dass zusätzliche Attributzeitreihen entsprechend dem Modellierungsansatz unmittelbar auf einzelne Objekte und nicht auf unterschiedliche Versionen des selben Objekts zu beziehen sind. Mit der Abbildung von Objektlebensdauern, dem Konzept der expliziten, semantiche detaillierten Modellierung objektübergreifender Übergänge und der attributscharfen Versionierung von Objektzuständen in Form von Zeitreihen vereint das LandModell^{TUM} in sich umfangreiche Instrumente zur umfassenden und konsistenten Abbildung der unterschiedlichen Facetten der zeitlichen Entwicklung von Realweltphänomenen. Sämtliche Facetten der zeitlichen Fortentwicklung von Objekten sind aufgrund ihrer expliziten Abbildung im Modell unmittelbar für weiterführende Analysen zugänglich.

Das semantiche Modell des LandModell^{TUM} setzt vollständig auf internationalen Normen der ISO 191xx Normenfamilie auf und bietet damit aufgrund der formalen Beschreibung und der Maschineninterpretierbarkeit ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen Datenhaltungs-, Bereitstellungs- und Visualisierungskomponenten aus dem Bereich der Geoinformatik einschließlich der Möglichkeit zur Ableitung von Datentransformaten. Bei der Konzeption des Informationsmodells kann gezeigt werden, dass sich die verschiede-

nen Facetten der zeitlichen Fortentwicklung von Objekten mit Modellierungsbausteinen der ISO 191xx Normenfamilie abbilden lassen.

In der vorliegenden Arbeit kann zudem gezeigt werden, dass sich das objektorientierte Informationsmodell einschließlich der entwickelten Konzepte zur Abbildung der verschiedenen Facetten einer zeitlichen Fortentwicklung von Objekten auf die Strukturen objektrelationaler DBMS - wie hier PostgreSQL - abbilden lässt. Diese Abbildung erfolgt einerseits unter Verwendung objektorientierter Konzepte des DBMS sowie andererseits anhand klar definierter Abbildungsregeln. Das LandModell^{TUM} demonstriert zudem, wie sich anhand der im Projekt definierten Abbildungsregeln die Semantik des Modells in menscheninterpretierbarer Form innerhalb des Datenbanksystems aufrechterhalten lässt.

Für den Aufbau des Monitoringsystems werden sämtliche im Modell abgebildeten Objektarten über komplexe Integrationsprozesse mit realen, mehrjährigen sowie landesweit flächendeckend bzw. vollständig vorliegenden Geodaten verschiedener Quellen beschickt. Die im LandModell^{TUM} entwickelten Integrationsprozesse beinhalten eine Reihe grundlegender Konzepte zur zeitlich rückwirkenden Ableitung von Lebensdauer, Zustandsveränderungen und objektübergreifenden Übergangsbeziehungen aus Abfolgen aufeinanderfolgender Schnappschüsse und leisten damit grundlegende Beiträge zur Forschung im Bereich der Geoinformatik. Sowohl für die Integration als auch für den Zugriff auf die abgebildeten Objektarten lässt sich eine hohe Performanz nachweisen. Das Informationssystem beinhaltet zudem eine Reihe grundlegender Schnittstellen und Konzepte zur Überführung der komplexen Datenstruktur des Informationssystems in eine „flache“ Datenstruktur, die sich von gängigen Geoinformationssystemen einlesen und weiterverarbeiten lässt.

Innerhalb des Projekts LandModell^{TUM}, welches auch dieser Arbeit zugrunde liegt, kann das Konzept einer Kopplung des Informationsmodells mit komplexen Analysemethoden einschließlich dem Konzept der semantischen Anreicherung von Objekten erfolgreich umgesetzt und anhand verschiedener Anwendungsfälle demonstriert und evaluiert werden. Sämtliche Ergebnisse der entwickelten Analysemethoden greifen auf die im Informationssystem abgebildeten Einzelobjekte zurück, prozessieren diese und speichern die jeweiligen Ergebnisse mit Bezug auf die betreffenden Objekte zurück in das System. Damit stehen die erzielten Ergebnisse für eine integrierte Betrachtung sowie für weiterführende Analysen auf Einzelobjektebene zur Verfügung. Die Abbildung der Ergebnisse erfolgt kleinteilig und in Form von Verweisen auf die betreffenden bzw. beteiligten Objekte. Diese Form der Abbildung wirkt sich unmittelbar positiv auf den Detaillierungsgrad und die mögliche Vielfalt weiterführender Analysen aus. Der unmittelbare Nutzen dieses Konzepts konnte in den Untersuchungen - insbesondere am Beispiel der Transportpfade und Erschließungsflächen - bereits umfassend demonstriert werden.

Auch die Einsetzbarkeit des Modells für die Beantwortung von Forschungsfragen verschiedener Fachbereiche lässt sich innerhalb des Projekts LandModell^{TUM} anhand verschiedener interdisziplinärer Beispiele demonstrieren. Die dabei geleisteten Mehrwerte für die verschiedenen Fachdisziplinen sollen in den folgenden beiden Abschnitten herausgestellt werden.

12.2 Wissenschaftliche Beiträge im Forschungsbereich der Landentwicklung

Eine grundlegende Idee hinter dem LandModell^{TUM} besteht von Anfang an im Aufbau eines landesweiten Monitoringsystems zur detaillierten Beschreibung, Verortung und Dokumentation von Veränderungen der Parzellenstrukturen insbesondere durch die nicht selten pachtbasierte Zusammenlegung von Parzellen zu größeren Bewirtschaftungseinheiten sowie zur Erkennung und Dokumentation von Übergängen landwirtschaftlicher Nutzfläche in andere Formen der Landnutzung. Die im LandModell^{TUM} entwickelten und auch erfolgreich in einem datenbankbasierten Informationssystem umgesetzten Konzepte zur semantisch wie geometrisch detaillierten Abbildung entsprechender Übergangsbeziehungen gehen deutlich über die vielfach praktizierten Ansätze einer Bilanzierung der Anzahl bzw. der Flächensummen landwirtschaftlicher Parzellen über die Zeit hinaus (stellvertretend: Bayerisches Landesamt für Statistik 2019; BMEL 2020). Mit Hilfe des entwickelten Systems lassen sich in einem landesweiten und skalenübergreifenden Monitoring strukturelle Parzellenveränderungen erkennen, analysieren und exakt verorten. Damit bieten die Ergebnisse des LandModell^{TUM} eine objektive Grundlage für die Erkennung und Begleitung regionaler Strukturveränderungen durch die Verwaltung für Ländliche Entwicklung.

Erstmals liefern die im LandModell^{TUM} entwickelten Methoden zur landesweiten Beschreibung, Klassifikation und parametrischen Charakterisierung der Form landwirtschaftlicher Parzellen detaillierte Informationen zu regionalen Unterschieden bestehender Parzellenstrukturen. Damit gehen die im LandModell^{TUM} entwickelten Methoden aufgrund der Möglichkeit zur umfassenderen geometrischen Beschreibung der Form landwirtschaftlicher Parzellen deutlich über den bisher praktizierten Ansatz einer Quantifizierung regionaler Strukturunterschiede ausschließlich anhand der Parzellengröße (stellvertretend: Röder et al. 2018; Zenger und Friebe 2015) hinaus. Gemeinsam mit den Ergebnissen zur zeitlichen Entwicklung von Parzellenstrukturen lassen sich die Erkenntnisse über die regional bestehenden Parzellenformen zur Entscheidungsunterstützung, zur räumlichen und zeitlichen Priorisierung von Verfahren der Ländlichen Entwicklung sowie zur gestalterischen Begleitung von Strukturveränderungsprozessen heranziehen.

Für einzelne Verfahrensgebiete ermöglichen die entwickelten Methoden zur Beschreibung von Flächenformen eine quantitative Beurteilung der Effekte durchgeführter Flurneuordnungsverfahren, welche über die bestehenden Ansätze einer Beschreibung der Größe der geschaffenen Parzellen oder des zahlenmäßigen Verhältnisses zwischen der Anzahl durch Zusammenlegung geschaffener und ursprünglich vorhandener Flurstücke hinausgeht. Die qualitative und quantitative Beschreibung der Parzellen ermöglicht in Verfahrensgebieten der Flurneuordnung zudem eine Erkennung von Parzellen, welche aufgrund ihrer Form ungünstige Bewirtschaftungsbedingungen aufweisen und daher möglicherweise für die Schaffung von Flächen für den Naturschutz in Betracht kommen.

Erstmalig liefert das LandModell^{TUM} eine landesweit flächendeckende, einzelparzellenbezogene, realitätsnahe und detailreiche Beschreibung bestehender Hof-Feld-Transportpfade und -distanzen in der Landwirtschaft. Diese geben nicht nur auf Ebene von Einzelparzellen Auskunft über bestehende Transportdistanzen sondern liefern gleichzeitig eine eingehende Beschreibung der Zusammensetzung einzelner Pfade. Die Ergebnisse lassen sich dabei sowohl für ein landesweites Monitoring bestehender Transportdistanzen als auch für eine detaillierte, einzelparzellenbezogene Analyse von Transportpfaden heranziehen. Vergleichbare Angaben waren zuvor nicht verfügbar. Für die Evaluierung von Flurneuordnungsver-

fahren bietet die Gegenüberstellung von Transportdistanzen vor und nach der Durchführung eines Verfahrens ein neuartiges, objektives Bewertungskriterium.

Aufgrund der kleinteiligen Abbildung der ermittelten Transportpfade in Form von Verweisen auf die jeweiligen Parzellen, Hofstellen sowie auf Segmente des Verkehrsnetzes als Pfadkomponenten lassen sich für Einzelsegmente detaillierte Angaben zur jeweils angebundene landwirtschaftlichen Nutzfläche ableiten. Die Angaben zur an ein Wegsegment angebundene landwirtschaftlichen Nutzfläche liefern wertvolle Aufschlüsse zur Bedeutung einzelner Wegsegmente innerhalb des Wegenetzes und bieten damit eine belastbare und objektive Grundlage für die bedarfsgerechte Ertüchtigung des ländlichen Wegenetzes sowie auch für die Konzeption interkommunaler Kernwegesysteme. Vergleichbare Angaben waren bislang nicht verfügbar oder unter sehr hohem Personal- und Zeitaufwand zu erheben (stellvertretend: Bertling et al. 2015). Mit den Werkzeugen des LandModell^{TUM} stehen landesweit flächendeckend, detaillierte und aus tatsächlichen Transportbeziehungen abgeleitete Informationen zur Erschließungsfläche einzelner Segmente des Verkehrsnetzes zur Verfügung. Neben dem Monitoring bestehender Gegebenheiten lassen sich die entwickelten Werkzeuge des LandAnalyticsToolkit^{TUM} auch zur iterativen Evaluierung möglicher Zustände der Zukunft (= Planungsszenarien) einsetzen, was sich insbesondere im Rahmen des durchgeführten Modellprojekts als äußerst hilfreich für die Konzeption von Kernwegesystemen herausstellt.

An Verfahren der Ländlichen Entwicklung sind typischerweise verschiedene Akteure (Behörden, Kommunen, Experten unterschiedlicher Fachbereiche etc.) beteiligt, welche die Informationen der jeweiligen Betrachtungsweise in getrennten und voneinander weitestgehend unabhängigen Fachinformationssystemen vorhalten. Das LandModell^{TUM} schafft durch die klare Definition von Objekten, Attributen und Beziehungen ein einheitliches, semantisches Verständnis der verschiedenen Komponenten innerhalb der Kulturlandschaft. Das im LandModell^{TUM} konsequent verfolgte Konzept der semantischen Anreicherung von Objekten um Informationen verschiedener Fachbereiche bzw. um Ergebnisse der durchgeführten Analysen vereinfacht im LandModell^{TUM} erheblich eine integrierte Betrachtung der untersuchten Aspekte. Fachinformationen unterschiedlicher Disziplinen lassen sich mit Hilfe dieses Konzepts transparent, redundanzfrei und konsistent ablegen. Die Fusion von Informationen über den gemeinsamen Bezug auf identische Bezugsobjekte stellte sich bereits im durchgeführten Modellprojekt *Kernwegekonzept NES-Allianz* mit zahlreichen Akteuren als sehr hilfreich heraus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: sowohl hinsichtlich der skalenübergreifenden und inhaltlichen Ausgestaltung des Modells als auch hinsichtlich der fachlichen Ausrichtung, Tiefe und Detailschärfe der durchgeführten Analysen leistet das LandModell^{TUM} für einzelne Verfahren und gleichzeitig für das landesweite Monitoring verschiedener Aspekte wertvolle Beiträge für den Fachbereich der Landentwicklung.

12.3 Wissenschaftliche Beiträge im Bereich der Agrarforschung

Viele der in Abschnitt 12.2 aufgeführten Beiträge des LandModell^{TUM} für die Landentwicklung gelten in ähnlicher Weise auch für die Agrar(landschafts)forschung. Beispielhaft sei das mit dem raumzeitlichen Informationsmodell anvisierte gemeinsame und disziplinenübergreifende Systemverständnis, das Konzept der Fusion interdisziplinärer Fachinformation über den gemeinsamen Bezug auf identische Objekte, die Erkennung und Analyse von Parzel-

lenveränderungen oder aber die Analysen zu Parzellenformen und Transportpfaden angeführt. Neben diesen bereits ausgeführten Aspekten existiert auch eine Reihe von Beiträgen des LandModell^{TUM}, welche speziell für die Agrarforschung von Relevanz sind.

So ermöglichen die landesweit flächendeckend auf der Ebene von Einzelobjekten vorliegenden Angaben zu Form, bestehenden Transportpfaden oder zur Qualität der Anbindung landwirtschaftlicher Parzellen an das Verkehrswegenetz eine mit bestehenden Informationssystemen bislang nicht erreichbare Vielzahl und fachliche Tiefe agrarökonomischer und agrarstruktureller Betrachtungen. Da jegliche Information mit Bezug auf die jeweils kleinste, räumlich-semantische Einheit vorliegt, sind dabei prinzipiell skalenübergreifende Betrachtungen auf Teilschlag-, Schlag-, Betriebs-, Landschafts- oder Landesebene möglich.

Die realisierten Konzepte zur umfänglichen Abbildung der Zeit als grundlegende Komponente des Informationssystems ermöglicht einerseits die eingehende Betrachtung der Evolution von Landschaftsausschnitten im Sinne der Entstehung oder dem Untergang einzelner Komponenten der Kulturlandschaft sowie andererseits auch eine detaillierte Analyse der Zustandsveränderungen von Einzelobjekten. Der im LandModell^{TUM} realisierte Ansatz der einzelattributbezogenen Versionierung macht die Abfolge von Attributzuständen unmittelbar für weiterführende Analysen zugänglich. So verfügen beispielsweise landesweit sämtliche im Informationssystem abgebildete Parzellen über detaillierte Angaben zur Abfolge landwirtschaftlicher Kulturen - eine Information mit unmittelbarer Relevanz für eine vielfältige, pflanzenbauliche wie auch agrarökologische Fragestellungen, welche zuvor nicht unmittelbar zugänglich war.

13 Ausblick und Forschungsbedarf

Mit dem LandModell^{TUM} werden wesentliche Grundlagen für den Aufbau eines raumzeitlichen, mehrskaligen und zunächst anwendungsneutralen Modells der Kulturlandschaft gelegt. Sämtliche der im Informationssystem abgebildeten Elemente repräsentieren dabei jeweils stabile Bezugspunkte für die Anreicherung um Fachinformation bzw. als Grundlage für die Entwicklung von Analysemethoden, deren Ergebnisse wiederum mit Bezug auf die jeweils kleinste räumlich-semantische Einheit im Informationssystem abgelegt werden. Den Kern dieses Systems bildet ein objektorientiertes, raumzeitliches Informationsmodell der Kulturlandschaft, welches die einzelnen räumlich-semantischen Komponenten ähnlich dem Konzept eines Digitalen Zwillings abbildet (siehe auch Machl et al. 2019a). Digitale Zwillinge entsprechen dabei der digitalen Repräsentation des jeweiligen Realweltphänomens, deren Zustand und Verhalten über die gesamte Lebensdauer jeweils mit dem physischen Gegenstück synchron gehalten wird. Das LandModell^{TUM} bildet grundlegende Komponenten der Kulturlandschaft mit Relevanz für verschiedene Fachdisziplinen ab und betrachtet diese als Referenzobjekte für die Fusion interdisziplinärer Information. Über den gemeinsamen Bezug von Fachinformation auf identische Objekte wird die integrierte Betrachtung von Phänomenen der Realwelt erheblich vereinfacht. In der bisherigen Entwicklungsstufe des LandModell^{TUM} ist die Zusammenführung von Fachinformation unterschiedlicher Disziplinen unmittelbar mit der Integration der Daten in das Informationssystem verbunden.

Ein großer Anteil von einzelobjektbezogener Fachinformation liegt jedoch zumeist verteilt in heterogenen Informationsmodellen und Datenbeständen vor, so dass in weiterführenden Arbeiten Konzepte für den Aufbau eines verteilten Digitalen Zwillings der Kulturlandschaft zu entwickeln sind. In unmittelbarem Zusammenhang mit dem Aufbau eines solchen verteilten Digitalen Zwillings der Kulturlandschaft steht auch das am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München entwickelte Konzept der *Smart Rural Area Data Infrastructure* (SRADI). Ziel dieser SRADI ist es, den verschiedenen Akteuren und Stakeholdern innerhalb der Kulturlandschaft einen einfachen Zugriff auf die zumeist heterogen und in verteilter Form vorliegenden Informationen zu einzelnen Phänomenen der Realwelt zu ermöglichen. Entsprechende Informationen sollen den Akteuren in bedarfsgerechter Form bereitgestellt werden. Dabei reicht die Bandbreite der Akteure von Wissenschaft und Forschung über diverse Fachbehörden und Planungsbüros bis hin zu Stakeholdern der land- und forstwirtschaftlichen Praxis oder des Umweltschutzes. Abbildung 110 gibt einen ersten, skizzenhaften Überblick der grundlegenden Komponenten des entwickelten Konzepts.

Wesentliche Komponenten des Konzepts bilden Akteure, Anwendungen, virtuelles Modell der physischen Realität, Sensordaten/IoT, Analysemethoden und insbesondere ein Katalogdienst, in welchem sämtliche Daten, Dienste und Methoden in räumlich, zeitlich und inhaltlich recherchierbarer Form registriert sind. Mit dem virtuellen Modell der Realität sowie auch mit den vorliegenden Analysewerkzeugen liefert das LandModell^{TUM} bereits grundlegende Elemente der SRADI. Eine ausführliche Erläuterung des Konzepts findet sich in Moshrefzadeh et al. (2020).

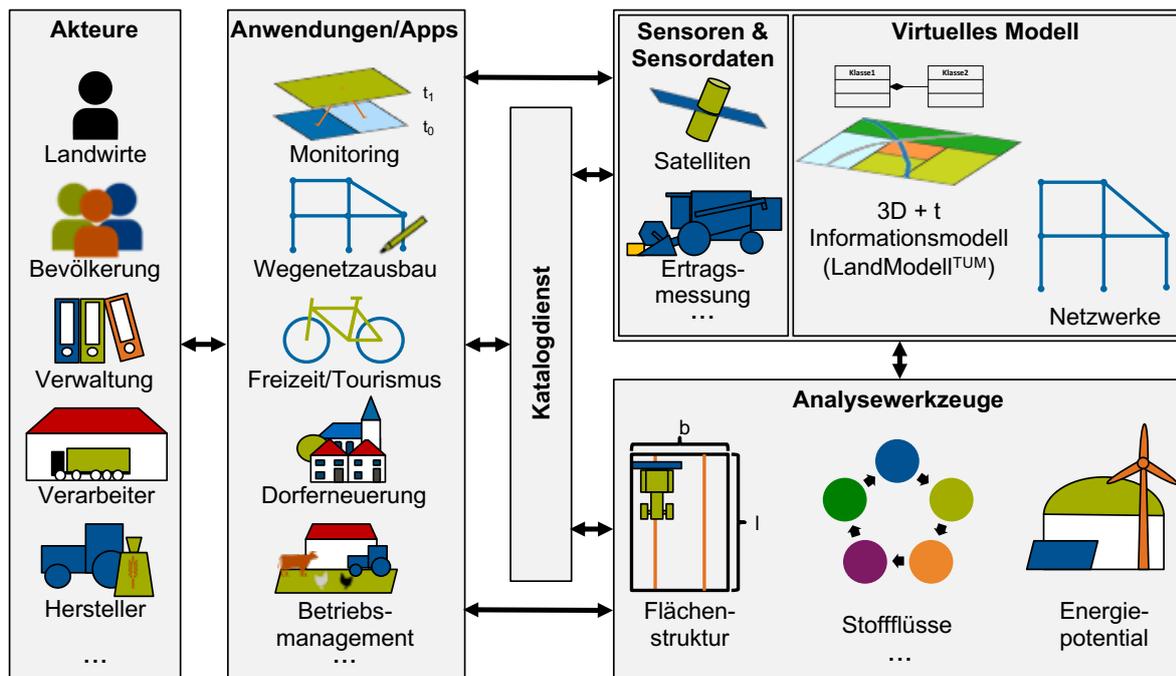


Abbildung 110: Grundsätzliche Überlegungen zur Ausgestaltung der Smart Rural Area Data Infrastructure (SRADI) in Anlehnung an Moshrefzadeh et al. (2017)

In ihrer derzeitigen Form beschränken sich das semantische Modell wie auch das Informationssystem des LandModell^{TUM} ausschließlich auf eine zweidimensionale Abbildung der Kulturlandschaft. Die Bearbeitung zahlreicher Fragestellungen der Agrar- bzw. Kulturlandschaftsforschung wie beispielsweise die Untersuchung von Erosionsprozessen, Wasserabflüssen oder aber von Umsetzungs- und Verlagerungsprozessen von Stoffen im Boden setzt eine vollständig drei- bzw. vierdimensionale Abbildung von Objekten voraus. In Abhängigkeit der zu beantwortenden Fragestellung kann dabei sowohl eine geometrische Abbildung von Realweltphänomenen als dreidimensionale Punkte, Linien oder Oberflächen wie auch eine Modellierung als Volumenkörper erforderlich sein. Hierzu sind in weiterführenden Arbeiten einerseits Konzepte für die Erweiterung des Modells zur Abbildung der dritten räumlichen Dimension sowie insbesondere auch für die ggf. erforderliche konsistente Mehrfachrepräsentation der Geometrie von Objekten innerhalb des selben Modells zu entwickeln. Erste Anhaltspunkte hierzu könnte das bereits in CityGML beschriebene LOD-Konzept liefern. Darüber hinaus sind Konzepte und Methoden für eine performante Extraktion, Beschreibung und Speicherung der Veränderung von dreidimensionalen Geobjekten über die Zeit zu entwickeln.

Zusätzlich zur im LandModell^{TUM} bereits berücksichtigten dynamischen Entwicklung von Objekten spielen im Kontext einer umfassenden Betrachtung der Kulturlandschaft insbesondere auch Ströme bzw. Flüsse eine herausragende Rolle. Hierzu zählt neben Wasser-, Biomasse-, Nährstoff-, Waren- oder Kapitalströmen auch beispielsweise die Ausbreitung von Wildtieren, Nützlingen oder Schadorganismen. Einzelne Objekte können dabei sowohl die Rolle eines Reservoirs als auch die eines Mediums für Zu- oder Abfluss einnehmen. In weiterführenden Arbeiten sind daher umfassende Konzepte zur Abbildung dynamischer Flüsse und Ströme innerhalb der Kulturlandschaft in Bezug auf die einzelnen Objekte zu erarbeiten.

A Veröffentlichungen, Vorträge und begleitende studentische Arbeiten

A.1 Wissenschaftliche Aufsätze im Kontext des LandModell^{TUM}

1. Moshrefzadeh, M., T. Machl, D. Gackstetter, A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2020). Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape. In: *Journal of Digital Landscape Architecture* 5, S. 173–186. URL: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/DLA_2020/537690019.pdf
2. Machl, T., J. Eisentraut, W. Ewald und T. H. Kolbe (2019b). Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen – vom landesweiten Monitoring zur Planungsunterstützung im ländlichen Wegebau. In: *Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft* 16. URL: http://www.dlkg.org/media/files/schriftenreihe/dlkg_heft16.pdf
3. Machl, T., A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2019a). Planning Agricultural Core Road Networks based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape. In: *Journal of Digital Landscape Architecture* 4, S. 316–327. URL: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/DLA_2019/537663034.pdf
4. Machl, T. und W. Ewald (2018). Neue Wege für die Zukunft? Erfahrungen aus dem Einsatz neuer Planungsgrundlagen für die Konzeption ländlicher Kernwegesysteme. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.* Hrsg. von T. P. Kersten, E. Gülch, J. Schiewe, T. H. Kolbe und U. Stilla. Bd. 27. DGPF e.V., Runder Tisch GIS e.V. und DGfK e.V. München, S. 857–861. URL: <http://www.dgpf.de/src/tagung/jt2018/proceedings/start.html>
5. Machl, T., W. Ewald, A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2018). Neue Wege zum landwirtschaftlichen Kernwegenetz? - Erfahrungen aus dem Einsatz neuartiger Planungsgrundlagen im Modellprojekt 'Kernwegekonzept NES-Allianz. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 143.2, S. 76–83. URL: https://geodaesie.info/sites/default/files/privat/zfv_2018_2_Machl_et-al.pdf
6. Kolbe, T. H. (2018). Digitale semantische Modelle der Kulturlandschaft zur fachübergreifenden Informationsintegration. In: *27. Hülsenberger Gespräche 2018*. Hrsg. von H. Wilhelm Schaumann Stiftung. Schriftenreihe der H. Wilhelm Schaumann Stiftung. Hamburg, S. 104–113. URL: https://www.schaumann-stiftung.de/SID-8ADBAAD5-AD1CEFEC/pn_schaumann_stiftung_broschuere_27_huelenberger_gespraech.html
7. Machl, T., W. Ewald, A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2016). Entwicklung eines Werkzeugs zur landesweit flächendeckenden Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen in Bayern. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanage-*

- ment 141.3, S. 197–205. URL: https://geodaesie.info/sites/default/files/privat/zfv_2016_3_Machl_et-al.pdf
8. Machl, T., A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2015b). LandModell: Ein semantisches 3D + t Datenmodell als Integrationsplattform zur Analyse der Agrarlandschaft und ihrer raum-zeitlichen Veränderungsprozesse. In: *Referate der 35. GIL Jahrestagung - Komplexität versus Bedienbarkeit Mensch-Maschine Schnittstellen*. Hrsg. von A. Ruckelshausen, H.-P. Schwarz und B. Theuvsen. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. Geisenheim, S. 101–104. URL: http://www.gil-net.de/Publikationen/27_101.pdf
 9. Machl, T., A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2015a). LandModell = CityGML für die Agrarlandschaft? In: *Geoinformationssysteme 2015 – Beiträge zur 2. Münchner GIL-Runde*. Hrsg. von T. H. Kolbe, R. Bill und A. Donaubaue. Heidelberg: Wichmann, S. 120–131. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1241299/309563.pdf>
 10. Machl, T. (2013). Flächendeckende Analyse arbeitswissenschaftlich relevanter Aspekte der Feldstücksgeometrie. In: *Geoinformationssysteme 2013*. Hrsg. von A. Koch, R. Bill und A. Donaubaue. Wichmann Verlag, S. 82–91
 11. Machl, T., A. Donaubaue, H. Auernhammer und T. H. Kolbe (2013). Shape and Ergonomics: Methods for Analyzing Shape and Geometric Parameters of Agricultural Parcels. In: *EFITA-WCCA- CIGR Conference Sustainable Agriculture through ICT Innovation*. EFITA, WCCA, CIGR. URL: <http://www.cigr.org/Proceedings/uploads/2013/0235.pdf>

A.2 Vorträge zum LandModell^{TUM} im Rahmen wissenschaftlicher Veranstaltungen (Auswahl)

1. 28.05.2019: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen der internationalen Tagung *Digital Landscape Architecture (DLA) 2019* in Dessau (Referent: Thomas Machl)
2. 17.10.2018: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen des *InterGeo Kongress* in Frankfurt (Referenten: Thomas Machl und Wolfgang Ewald)
3. 27.09.2018: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen *Bundestagung der Deutschen Landeskulturgesellschaft (DLKG) 2018* in Bad Berleburg (Referenten: Thomas Machl und Jürgen Eisentraut)
4. 13.06.2018: Vorstellung des Forschungsprojekts und der erzielten Ergebnisse im Rahmen der *Hülseberger Gespräche 2018* in Hamburg (Referent: Thomas Kolbe)
5. 08.03.2018: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen Tagung *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformatik - Kartographie (PFGK) 2018* (Referenten: Thomas Machl und Wolfgang Ewald)

6. 20.06.2017: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen der *Wegebautagung 2017 des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)*
(Referent: Thomas Machl)
7. 17.02.2017: Vortrag zum Forschungsprojekt im Rahmen des *Winterkolloquiums der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (DVW)* in Ansbach
(Referenten: Thomas Machl und Wolfgang Ewald)
8. 13.01.2017: Vortrag zum Forschungsprojekt im Rahmen des *Winterkolloquiums der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (DVW)* in München
(Referenten: Thomas Machl und Wolfgang Ewald)
9. 22.09.2016: Vorstellung des Forschungsprojekts und erzielter Ergebnisse im Rahmen des *Symposiums des Hans Eisenmann-Zentrums*
(Referent: Thomas Kolbe)
10. 28.10.2015: Vorstellung des Forschungsprojekts im Rahmen der *Hans Eisenmann-Zentrum Akademie* in Weißenstephan
(Referenten: Thomas Machl und Andreas Donaubaue)

A.3 Studentische Arbeiten im Kontext des LandModell^{TUM}

1. Gerl, S. (2018). Verkehrswegebelaugung durch landwirtschaftlichen Verkehr. Projektarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
2. Gapp, K. (2018). Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung für die Planung landwirtschaftlicher Kernwegenetze. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
3. Astner, C. (2018). Erstellung eines Geodesign-Werkzeugs zur naturschutzfachlichen Bewertung beim Entwurf von Kernwegenetzen. Projektarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
4. Astner, C. (2017). Untersuchung eines neuen Planungsansatzes zur Konzeption überregionaler Kernwegenetze für die Landwirtschaft. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
5. Hagspiel, N. (2016). Entwicklung eines Geodesign-Werkzeugs zur Planungsunterstützung im ländlichen Wegebau. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik
6. Fischl, G. (2015). Werkzeuge zur Dekomposition komplexer Parzelligeometrien und zur Abschätzung von Fahrwegen. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik

B Raumzeitliche Veränderung der Kulturlandschaft

B.1 Fortführung und Neubildung landwirtschaftlicher Parzellen

Tabelle 4: Fortführung und Neubildung von Feldstücken bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben (Bayern gesamt)

	Jahr der integrierten Zeitscheibe																
	2010	2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	abs.	abs.	[%]	abs.	abs.	[%]	abs.	abs.	[%]	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	[%]
Objekte je Zeitscheibe, davon	1844 050	1816 020	100,0	1 798 587	100,0	100,0	1 799 565	1 797 462	100,0	1 811 760	100,0	1 802 806	100,0	1 794 918	100,0	1 792 754	100,0
Fortbestand (unveränderte Geometrie)	-	1 625 174	89,5	1 528 840	85,0	85,0	1 442 301	1 453 033	80,8	1 436 736	79,3	1 513 348	83,9	1 508 271	84,0	1 521 690	84,9
Fortbestand (Geometrieupdate)	-	76 669	4,2	131 653	7,3	7,3	166 723	170 759	9,5	177 573	9,8	153 348	8,5	160 090	8,9	153 719	8,6
Fortbestand gesamt	-	1 701 843	93,7	1 660 493	92,3	92,3	1 609 024	1 623 792	90,3	1 614 309	89,1	1 666 696	92,5	1 668 361	92,9	1 675 409	93,5
Objektneubildung ohne Vorgänger	1844 050	12 768	0,7	12 844	0,7	0,7	11 394	13 433	0,7	24 983	1,4	9 784	0,5	10 728	0,6	13 410	0,7
Objektneubildung wegen Abspaltung	-	48 265	2,7	64 112	3,6	3,6	107 788	93 788	5,2	103 772	5,7	75 244	4,2	69 121	3,9	64 285	3,6
Objektneubildung wegen Zusammenlegung	-	53 144	2,9	61 138	3,4	3,4	71 359	66 449	3,7	68 696	3,8	51 082	2,8	46 708	2,6	39 650	2,2
Neubildung gesamt	1 844 050	114 177	6,3	138 094	7,7	7,7	190 541	173 670	9,7	197 451	10,9	136 110	7,5	126 557	7,1	117 345	6,5

Tabelle 5: Fortführung und Neubildung von Schlägen bei der Integration zusätzlicher Zeitscheiben (Bayern gesamt)

	Jahr der integrierten Zeitscheibe												
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	abs.	[%]	abs.	[%]
Objekte je Zeitscheibe, davon	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.	abs.
	2 070 291	2 038 643	2 017 267	1 988 423	1 966 125	1 982 238	1 969 228	1 962 169	1 967 067	1 967 067	100,0	1 962 169	100,0
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Fortbestand (unveränderte Geometrie)	-	1 845 332	1 755 358	1 644 790	1 633 929	1 284 987	1 475 049	1 479 939	1 500 917	1 500 917	76,3	1 479 939	75,4
Fortbestand (Geometrieupdate)	-	63 933	109 502	142 062	146 806	164 120	202 111	199 042	190 703	190 703	9,7	199 042	10,2
Fortbestand gesamt	-	1 909 265	1 864 860	1 786 852	1 780 735	1 449 107	1 677 160	1 678 981	1 691 620	1 691 620	86,0	1 678 981	85,6
Objektneubildung ohne Vorgänger	2 070 291	60 092	62 452	86 353	73 186	324 566	11 142	11 995	14 890	14 890	0,7	11 995	0,6
Objektneubildung wegen Abspaltung	-	31 412	45 004	61 411	60 599	147 411	170 583	167 444	167 090	167 090	8,5	167 444	8,5
Objektneubildung wegen Zusammenlegung	-	37 874	44 951	53 807	51 605	61 154	110 343	103 749	93 467	93 467	4,8	103 749	5,3
Neubildung gesamt		129 378	152 407	201 571	185 390	533 131	292 068	283 188	275 447	275 447	14,0	283 188	14,4

B.2 Zusammenlegung landwirtschaftlicher Parzellen

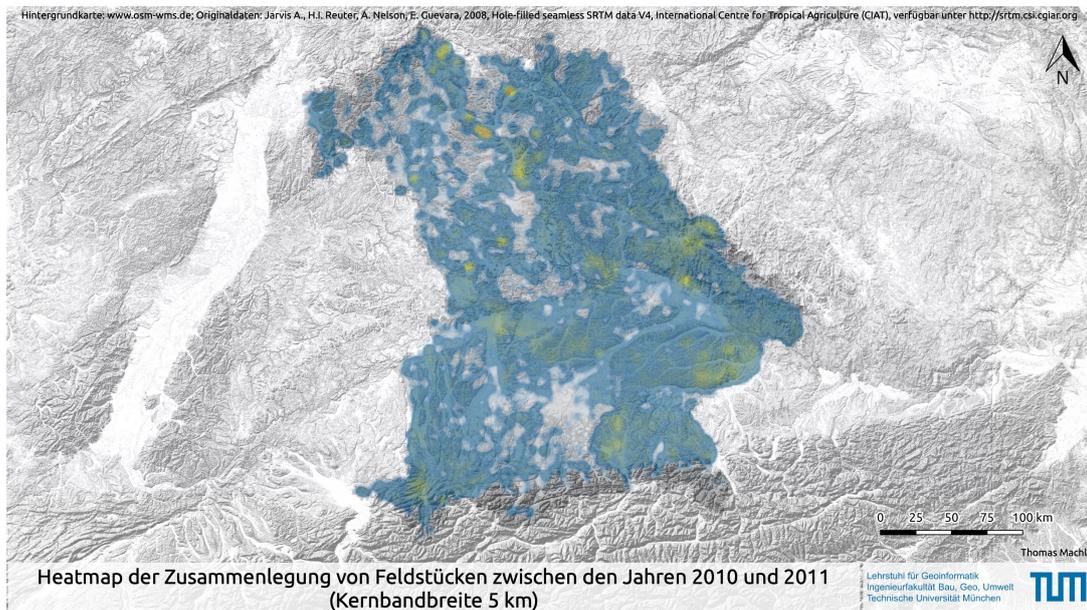


Abbildung 111: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2010 bis 15.05.2011; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

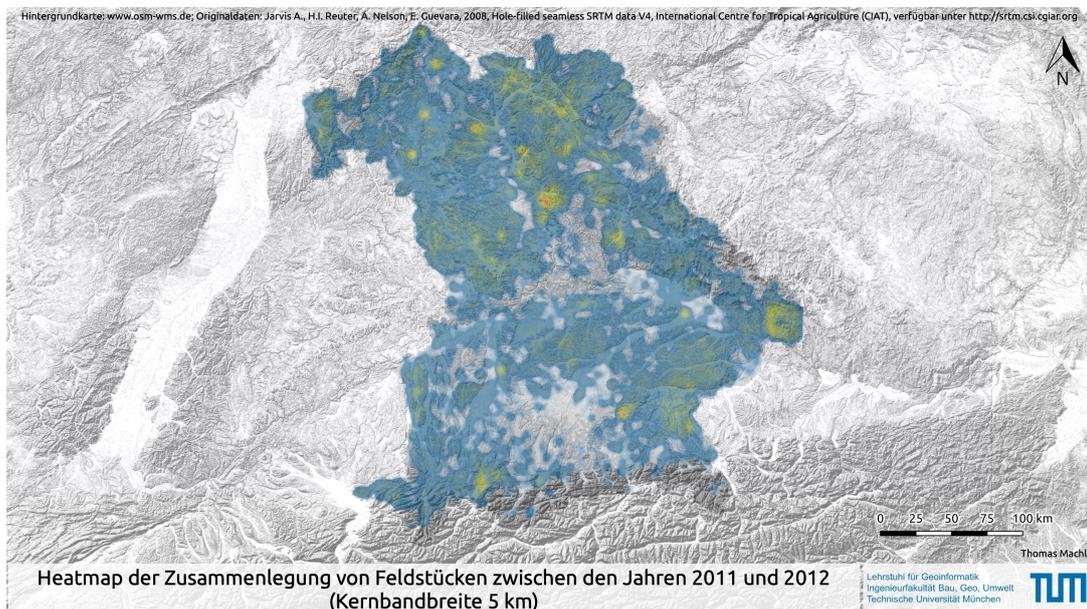


Abbildung 112: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2011 bis 15.05.2012; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

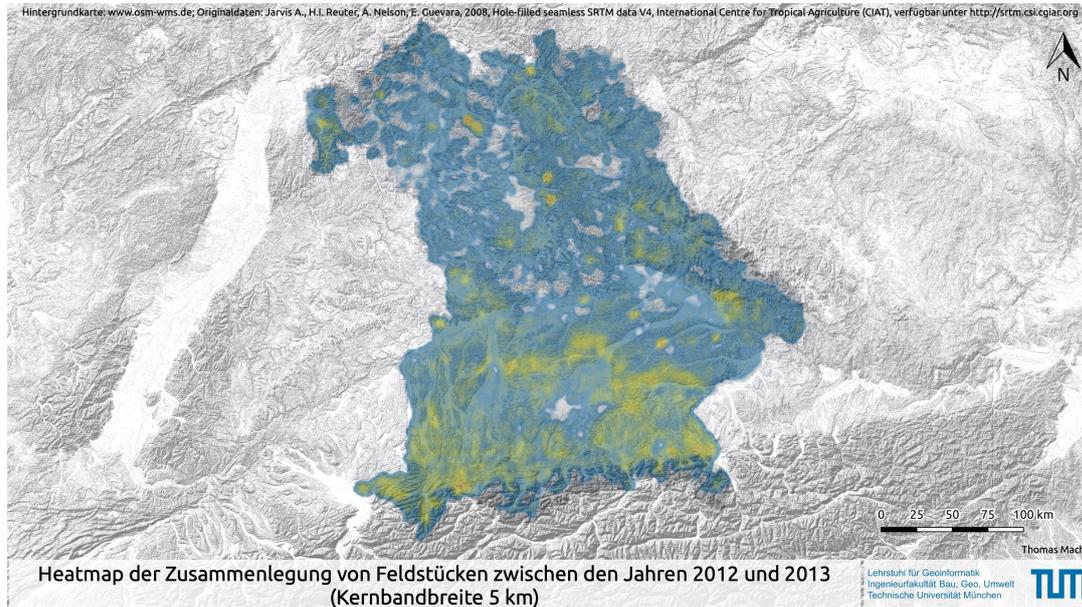


Abbildung 113: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2012 bis 15.05.2013; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

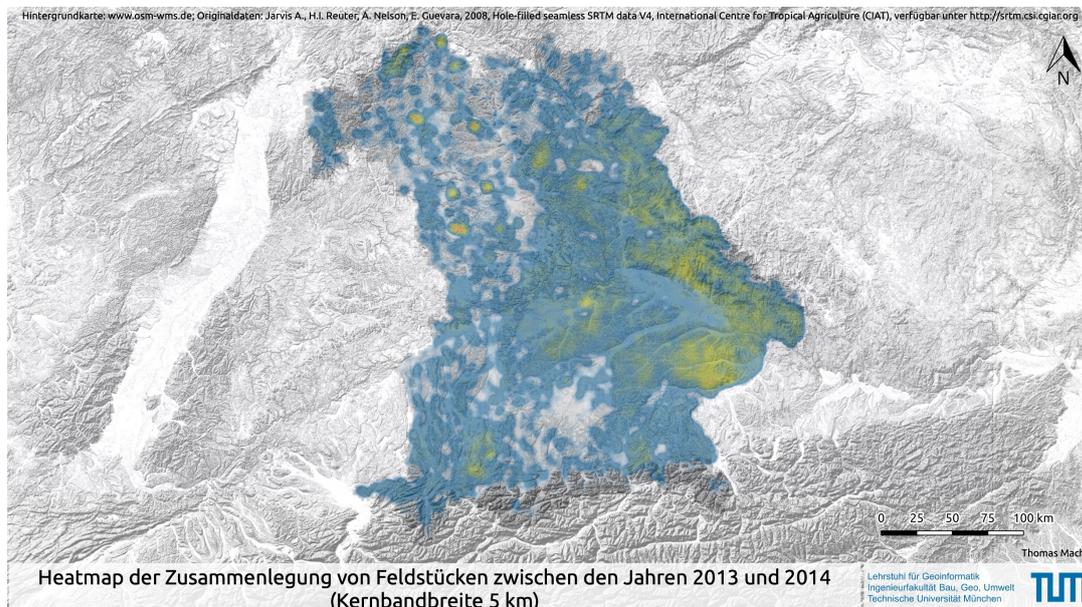


Abbildung 114: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2013 bis 15.05.2014; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

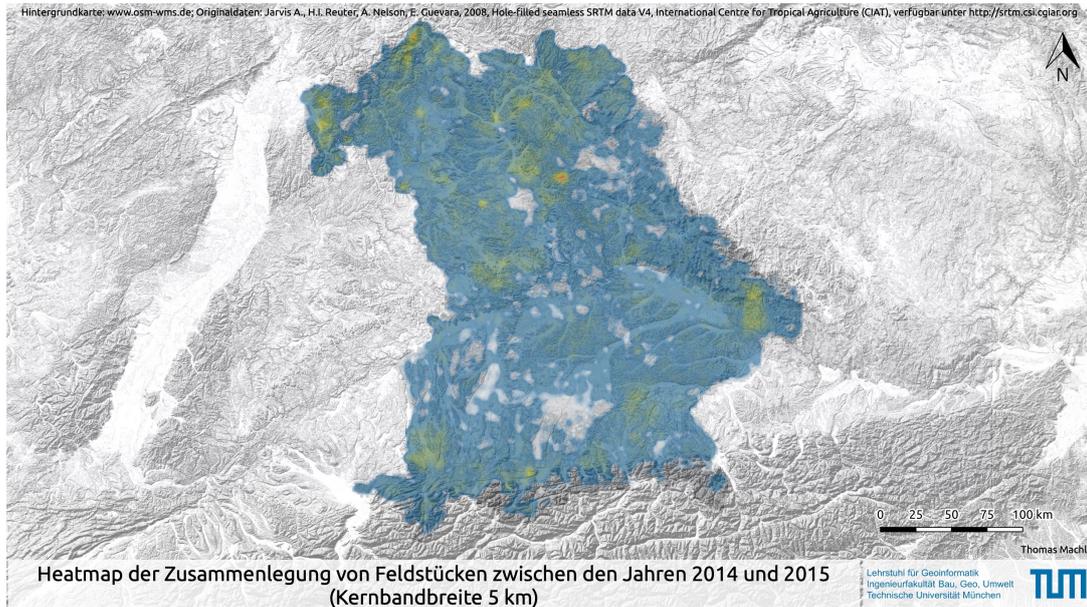


Abbildung 115: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2014 bis 15.05.2015; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

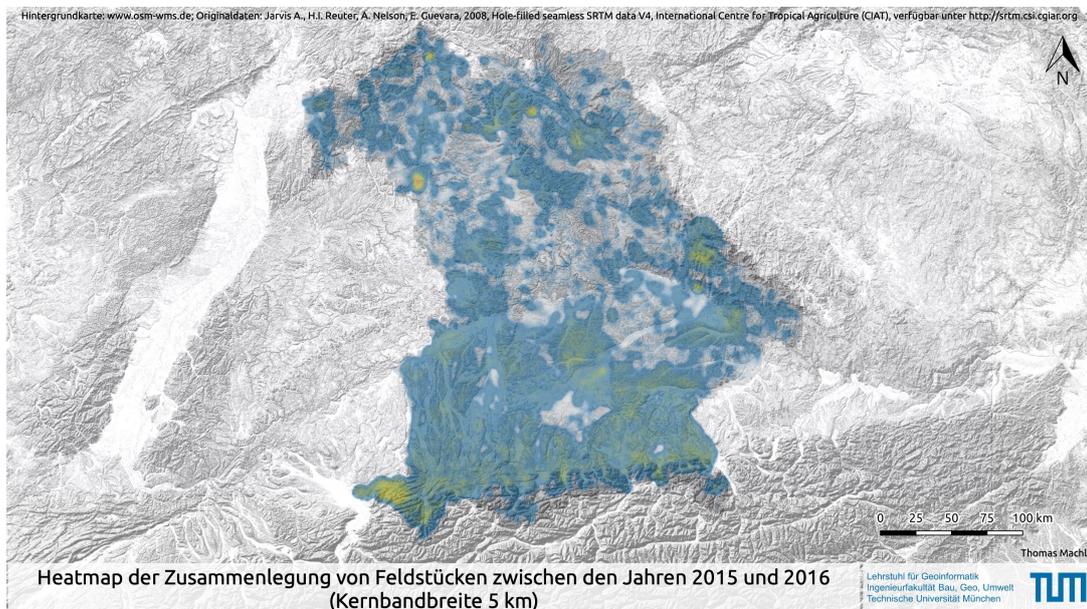


Abbildung 116: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2015 bis 15.05.2016; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

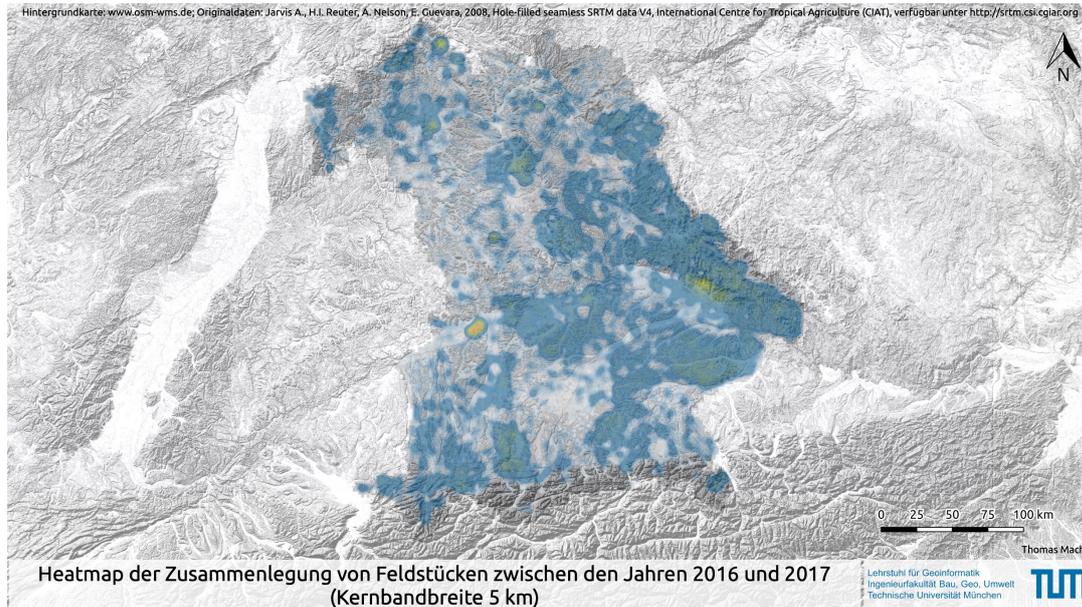


Abbildung 117: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2016 bis 15.05.2017; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

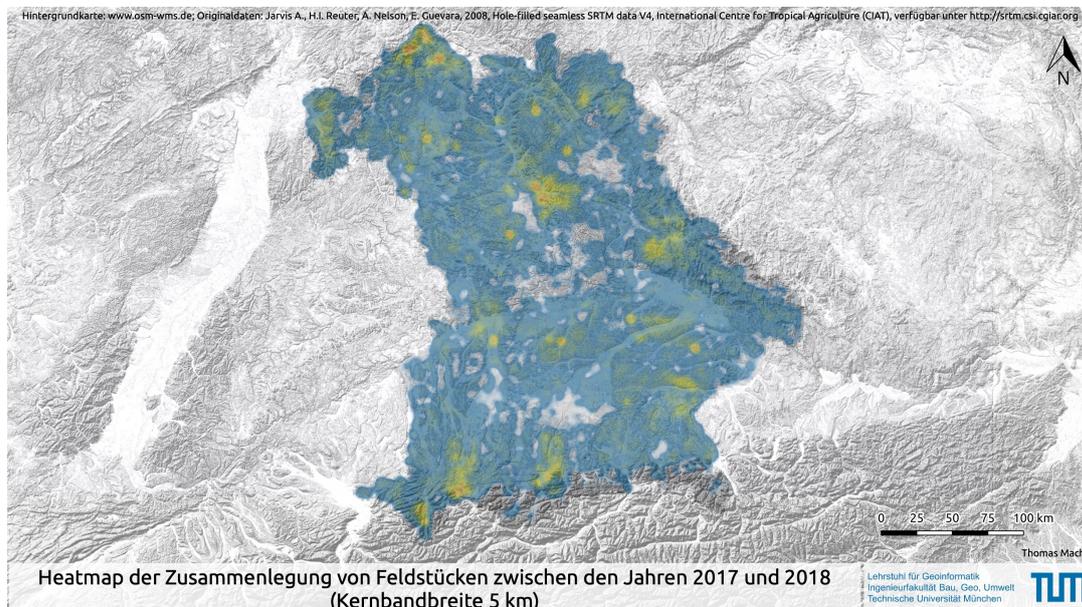


Abbildung 118: Heatmap der Zusammenlegung von Feldstücken im Zeitraum von 15.05.2017 bis 15.05.2018; blaue Bereiche weisen eine geringe, rote Bereiche eine hohe räumliche Dichte auf

B.3 Flächenbilanz der innerhalb des Datensatzes Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen

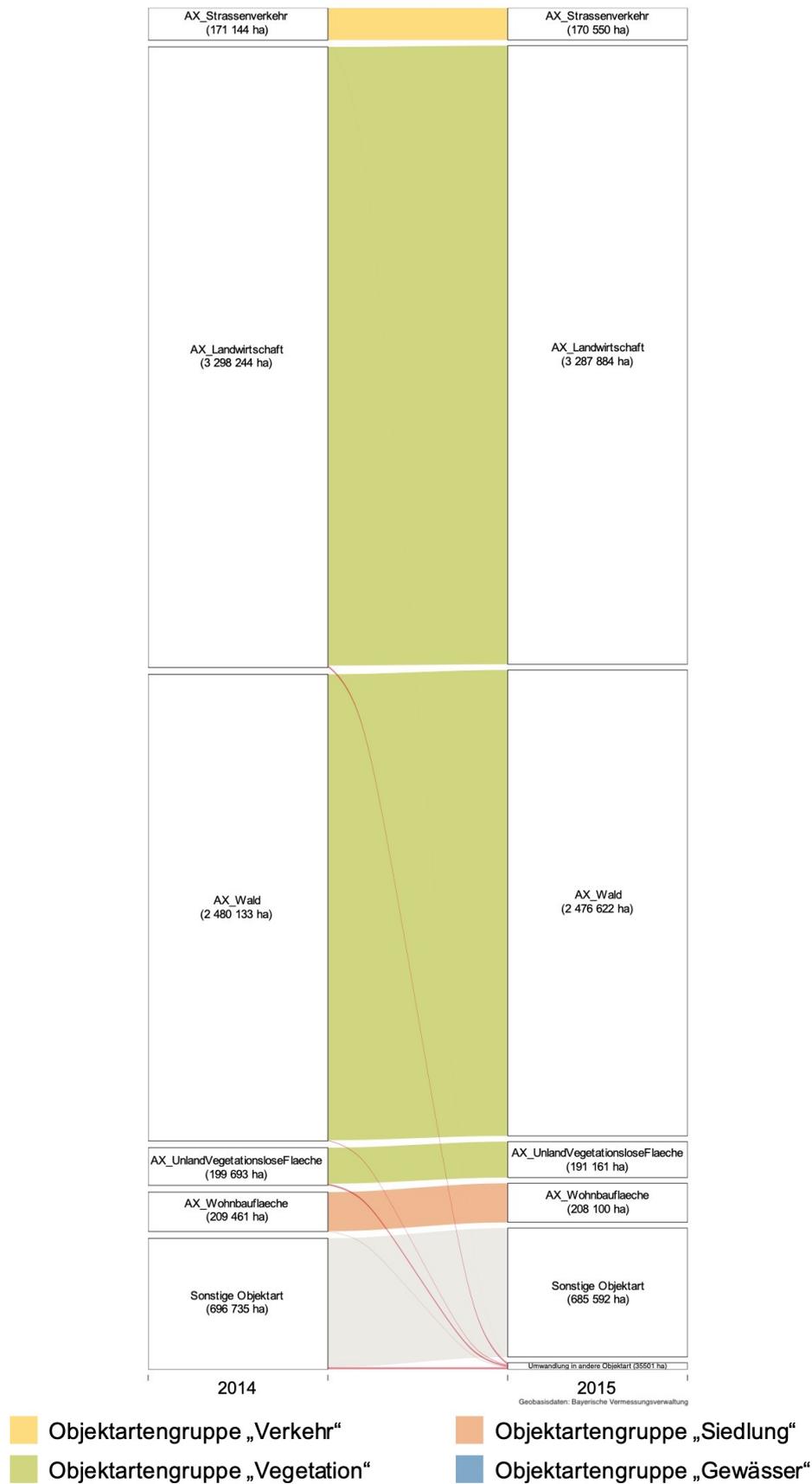


Abbildung 119: Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2014 (Stichtag: 14.05.2014) bzw. 2015 (Stichtag: 06.05.2015); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

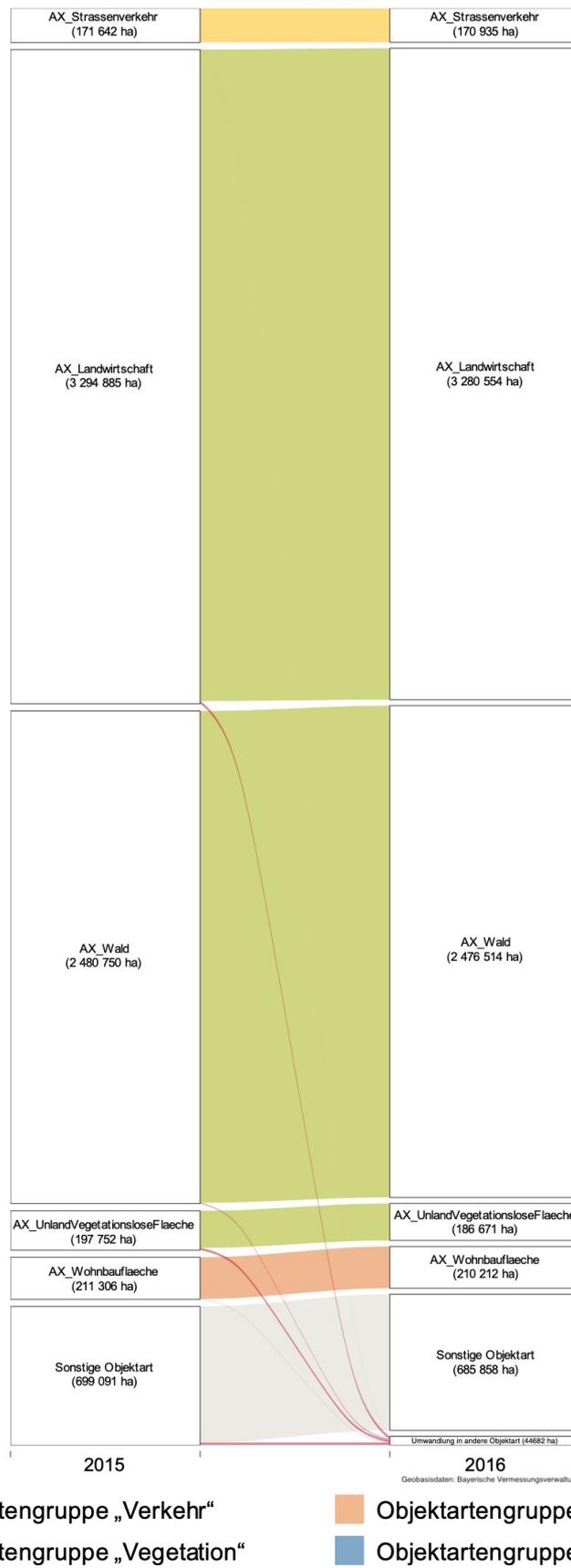


Abbildung 120: Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2015 (Stichtag: 06.05.2015) bzw. 2016 (Stichtag: 17.05.2016); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

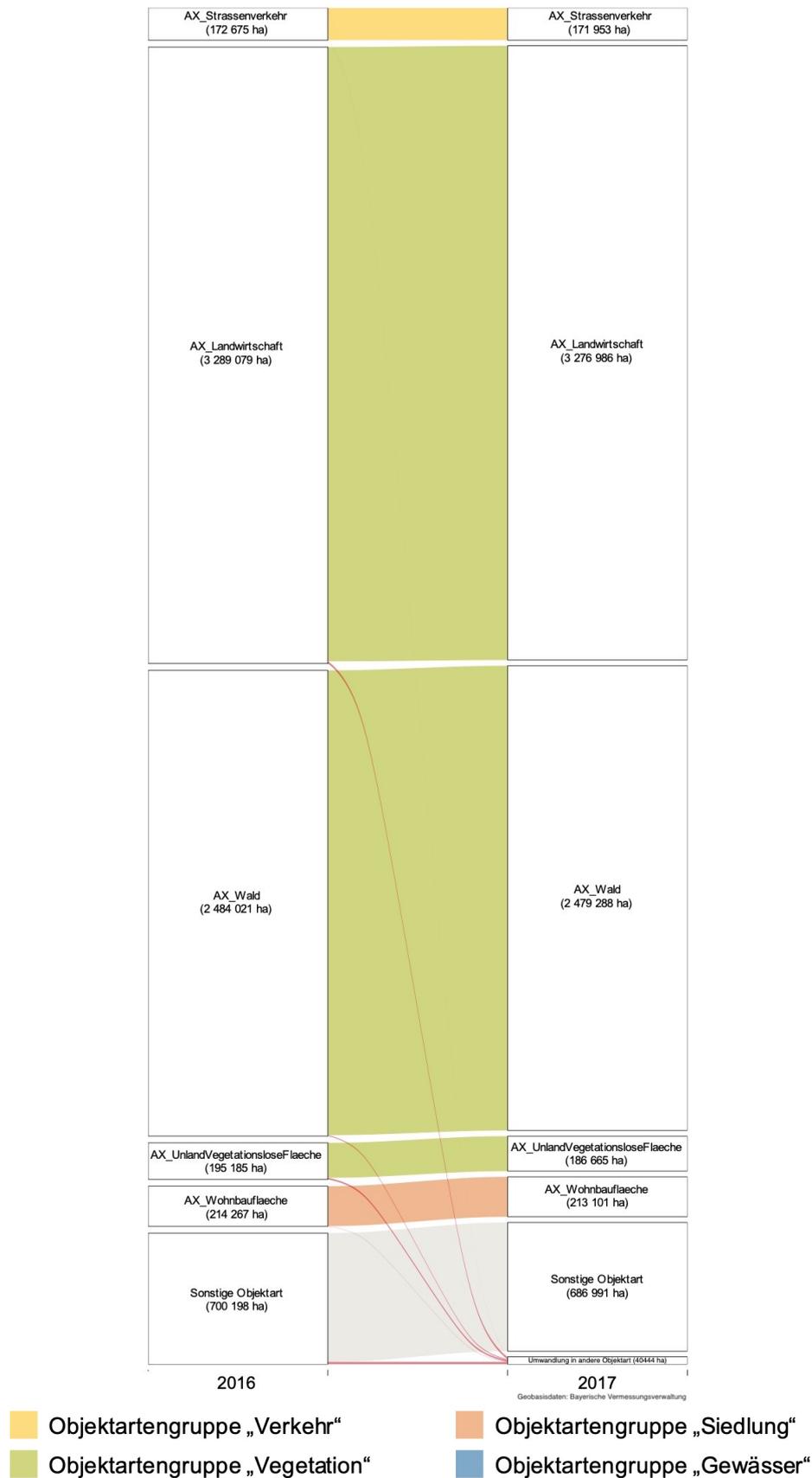
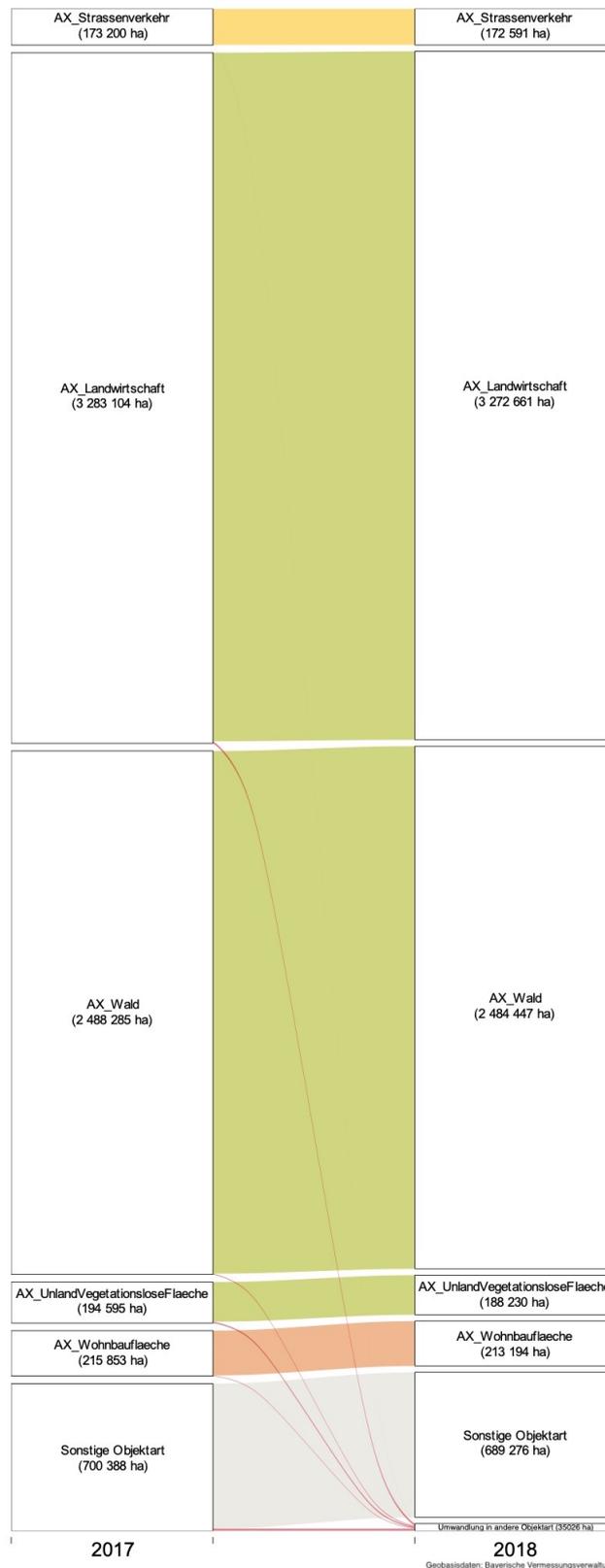


Abbildung 121: Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2016 (Stichtag: 17.05.2016) bzw. 2017 (Stichtag: 26.05.2017); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet



- Objektartengruppe „Verkehr“
- Objektartengruppe „Siedlung“
- Objektartengruppe „Vegetation“
- Objektartengruppe „Gewässer“

Abbildung 122: Flächenbilanz der im Datensatz Tatsächliche Nutzung abgebildeten Objektarten bzw. Objektartengruppen für die Jahre 2017 (Stichtag: 26.05.2017) bzw. 2018 (Stichtag: 23.05.2018); Objektarten mit einer Gesamtfläche von weniger als 150 000 ha sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

B.4 Objektartenübergreifende Übergänge

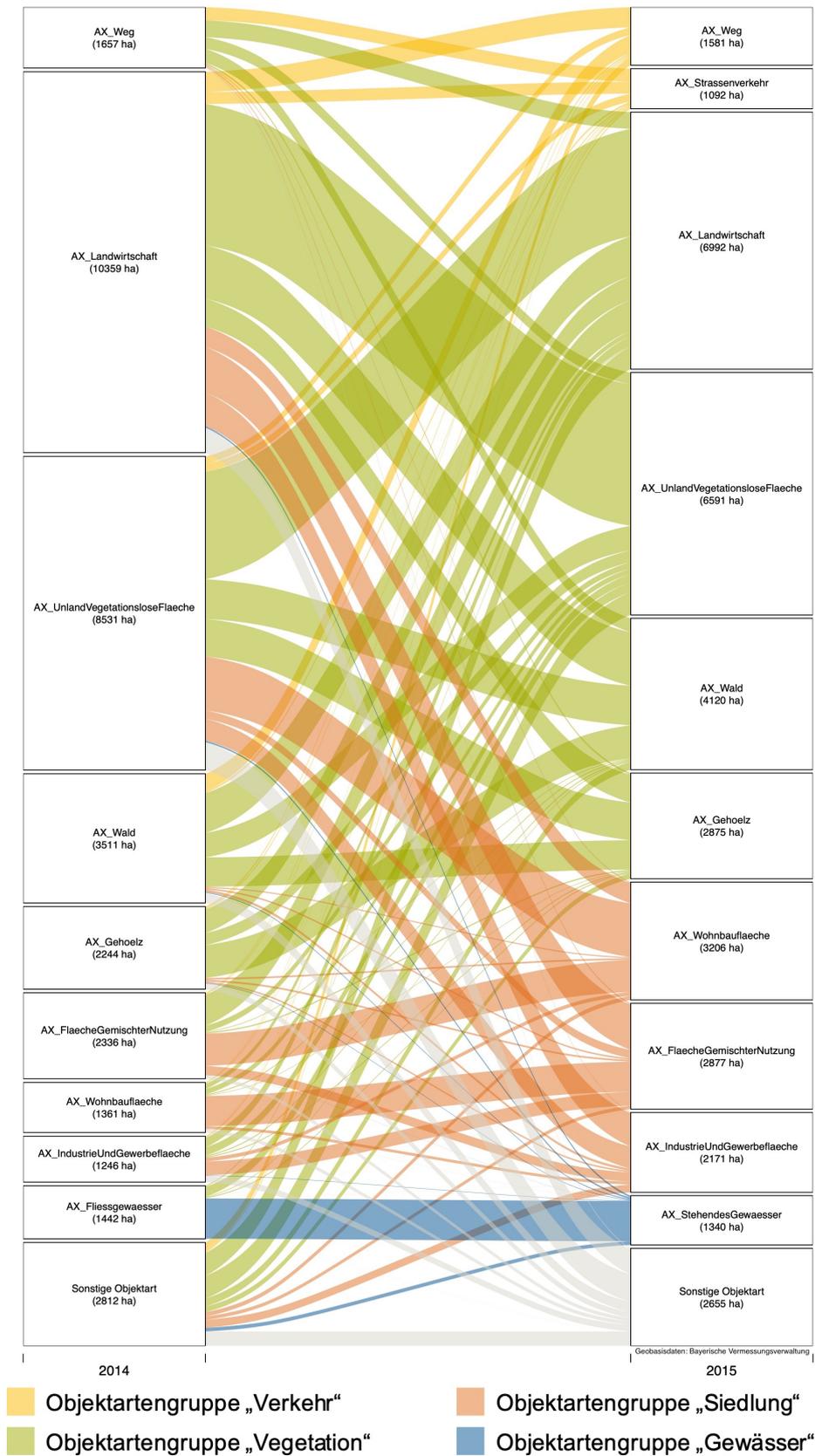


Abbildung 123: Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 14.05.2014 und 06.05.2015; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

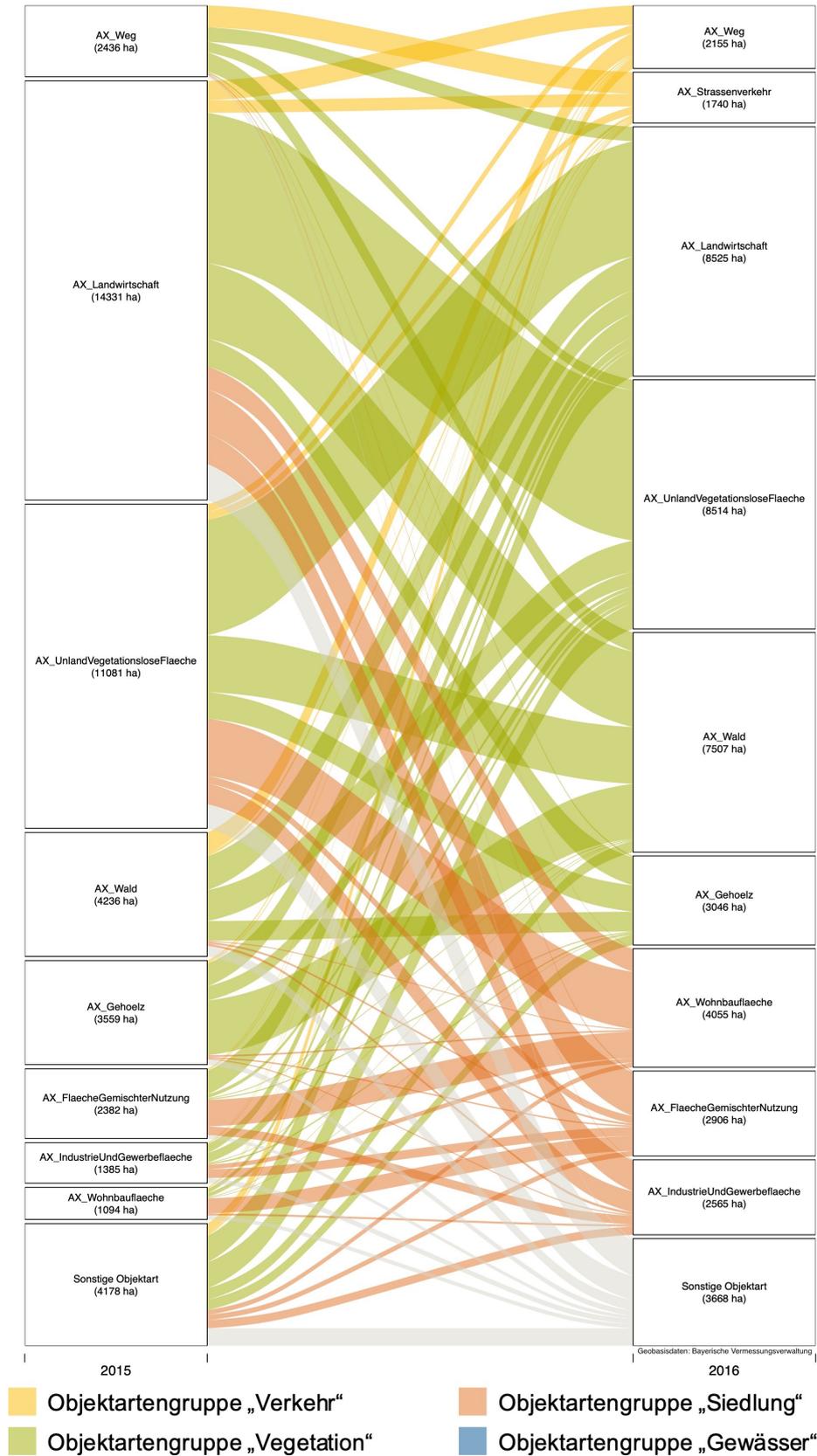


Abbildung 124: Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 06.05.2015 und 17.05.2016; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

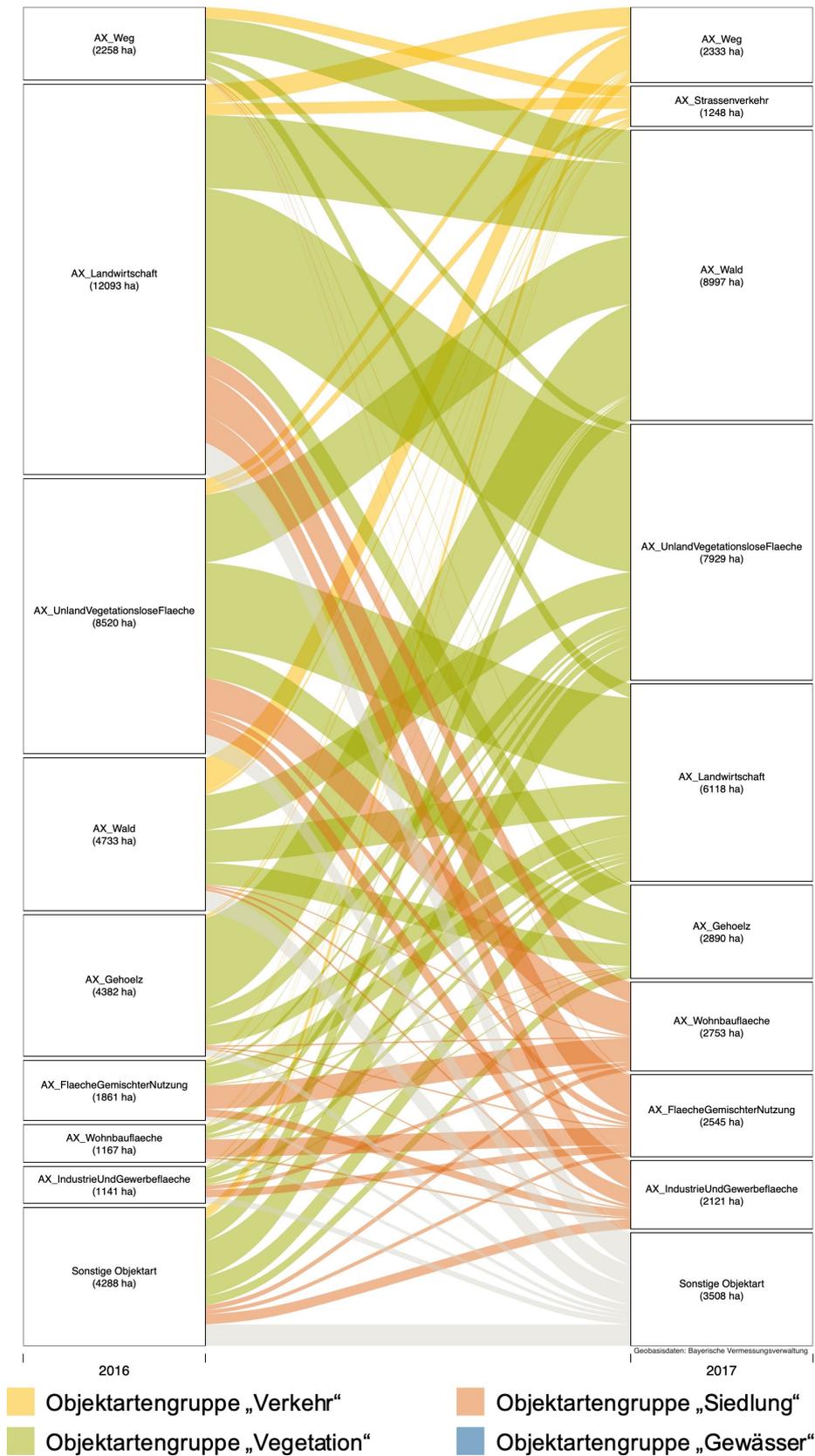


Abbildung 125: Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 17.05.2016 und 26.05.2017; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1 000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

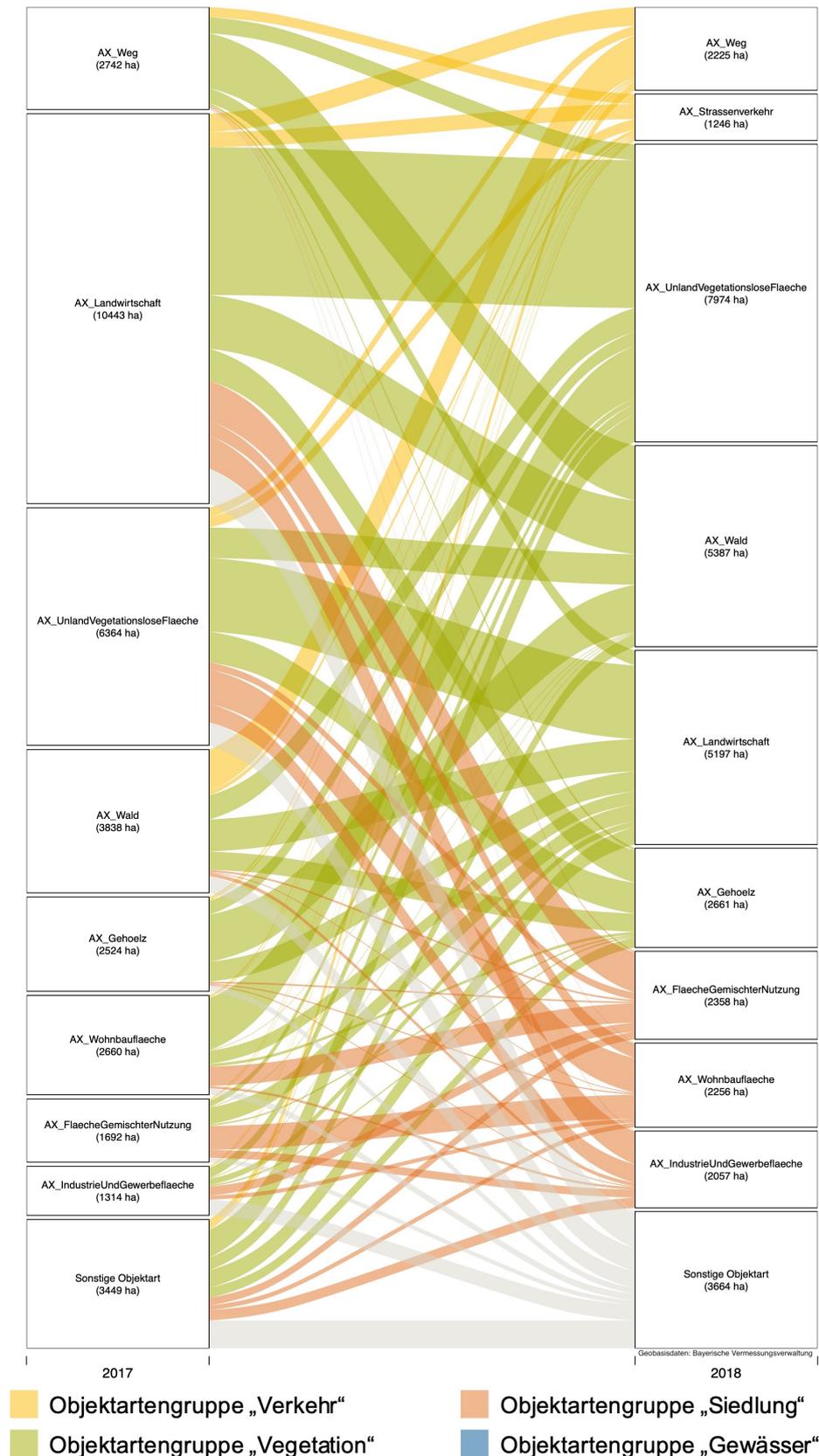


Abbildung 126: Quellen und Senken einer objektartenübergreifender Veränderungen von Objektarten bzw. Objektartengruppen des Datensatzes „Tatsächliche Nutzung“ zwischen 26.05.2017 und 23.05.2018; Objektarten, die mit einem flächenhaften Umfang von insgesamt weniger als 1 000 ha als Quelle bzw. Senke fungieren, sind der Kategorie „Sonstige Objektart“ zugeordnet

C Parzellengrößen und -formen in Bayern

C.1 Feldstücksgrößen in Bayern

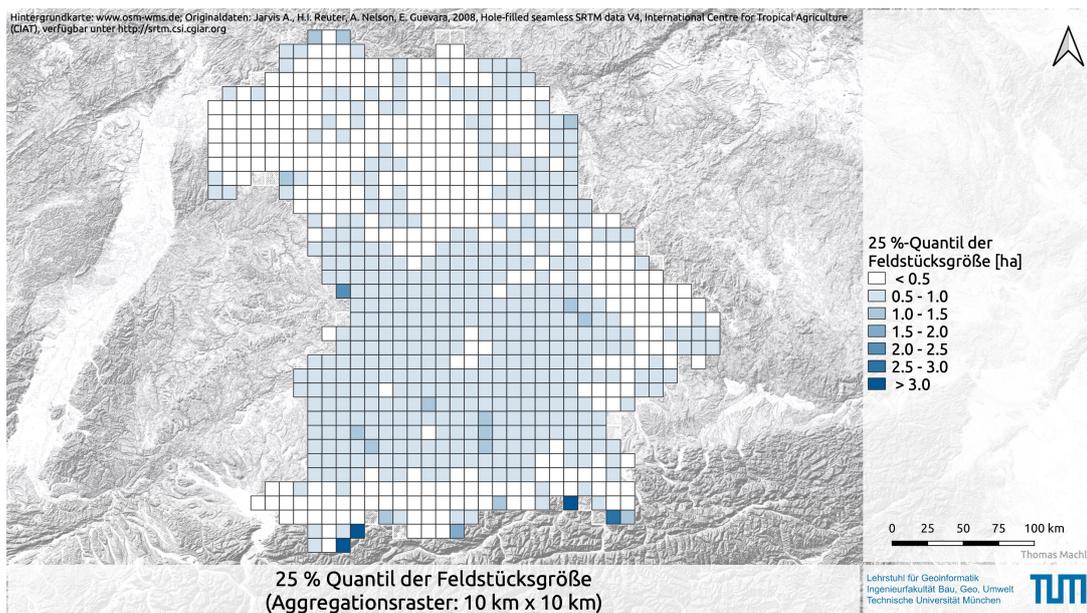


Abbildung 127: 25 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

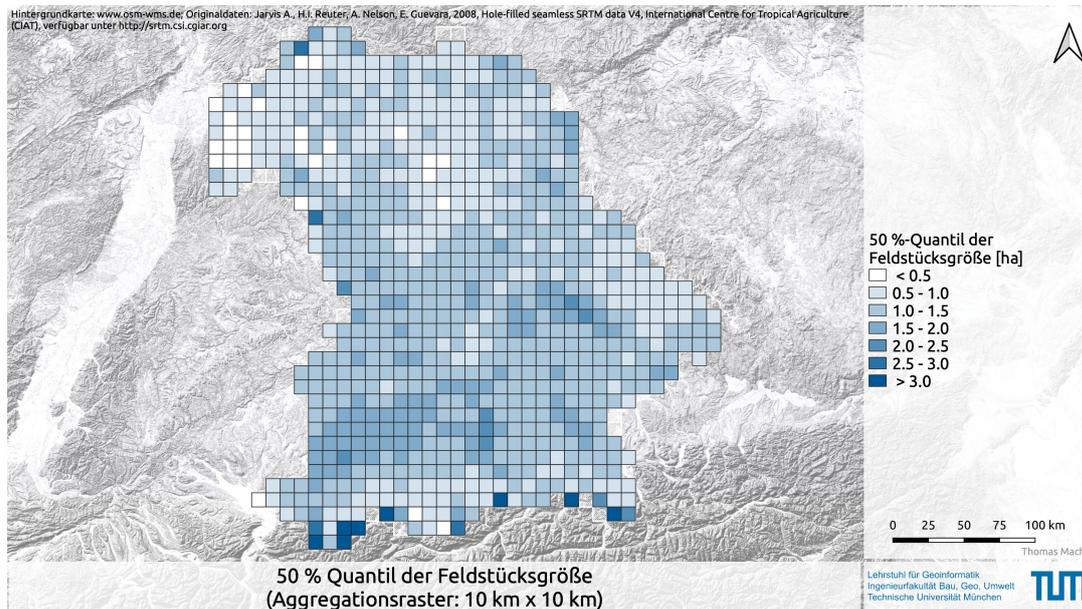


Abbildung 128: 50 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

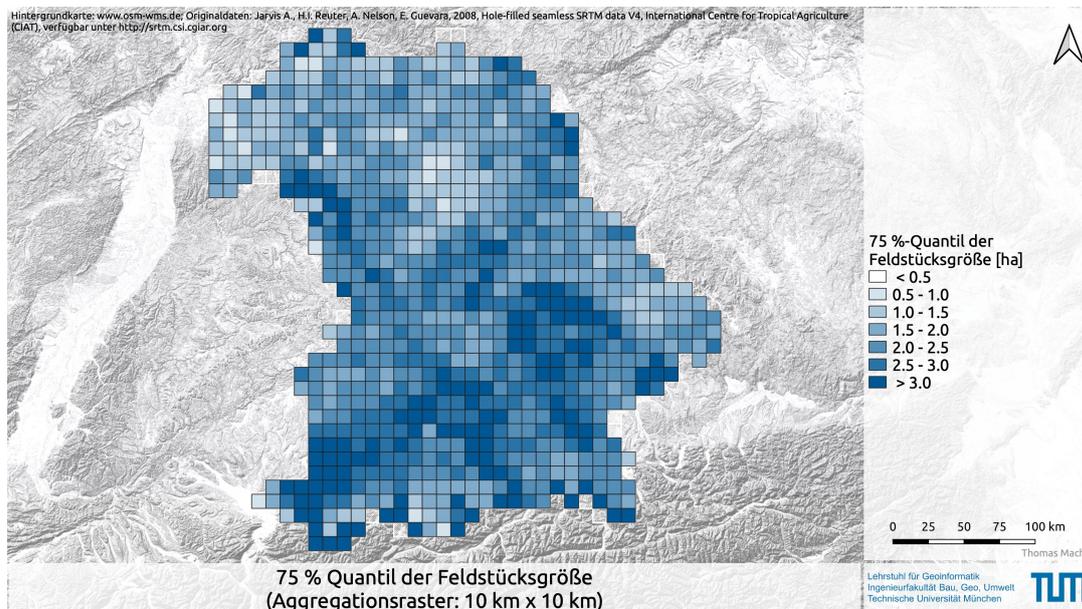


Abbildung 129: 75 %-Quantil der Feldstücksgröße aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

C.2 Formindikatoren zur Beschreibung der Feldstücksgeometrie

C.2.1 Indikator Konvexität

C.2.1.1 Indikator Konvexität (Perimeter)

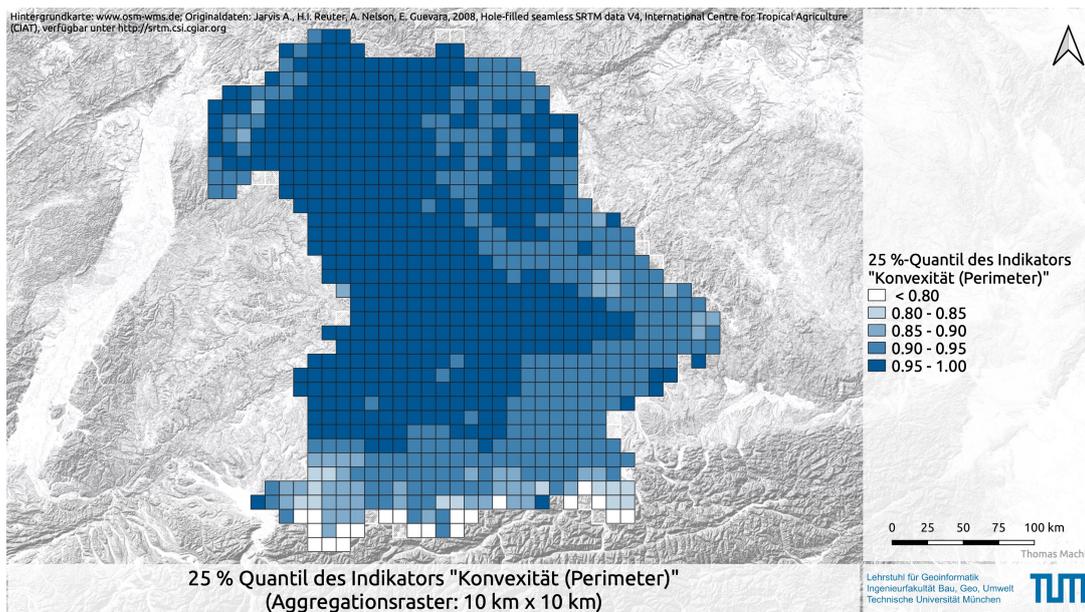


Abbildung 130: 25 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

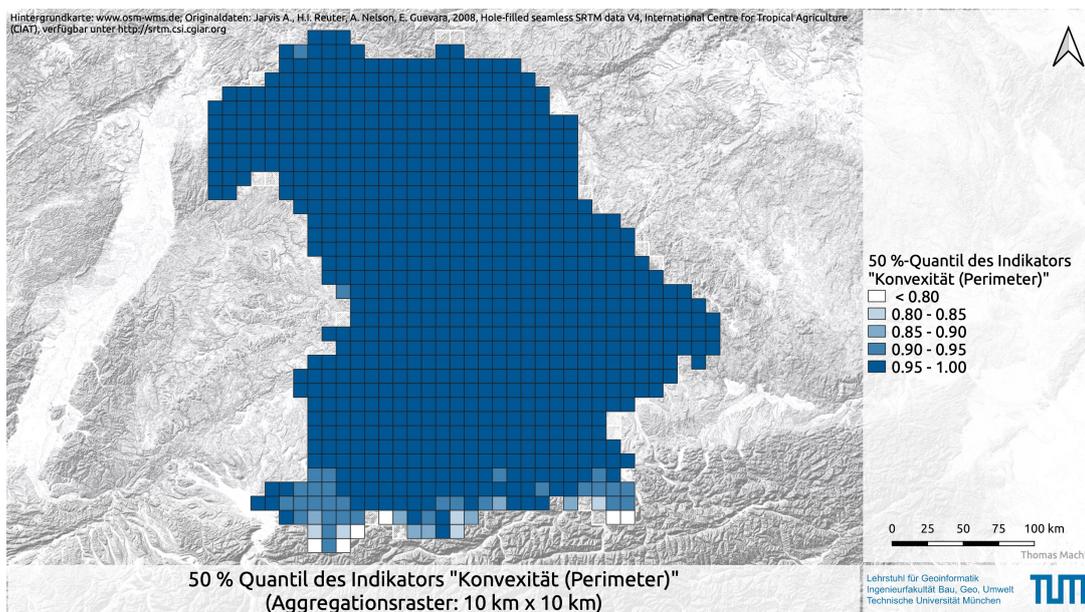


Abbildung 131: 50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

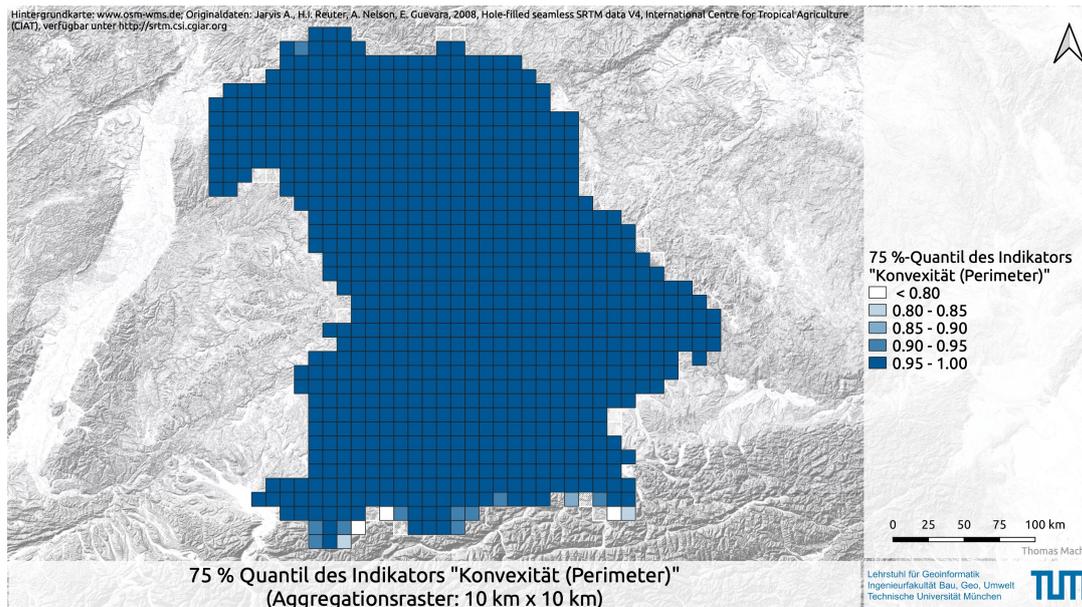


Abbildung 132: 75 %-Quantil des Indikators Konvexität (Perimeter) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

C.2.1.2 Indikator Konvexität (Fläche)

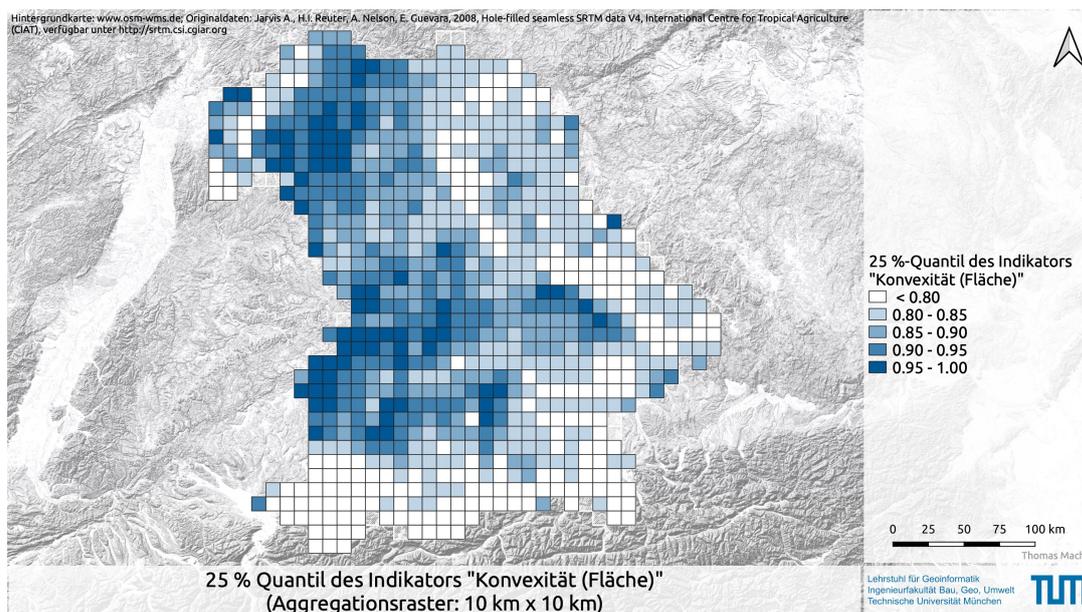


Abbildung 133: 25 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

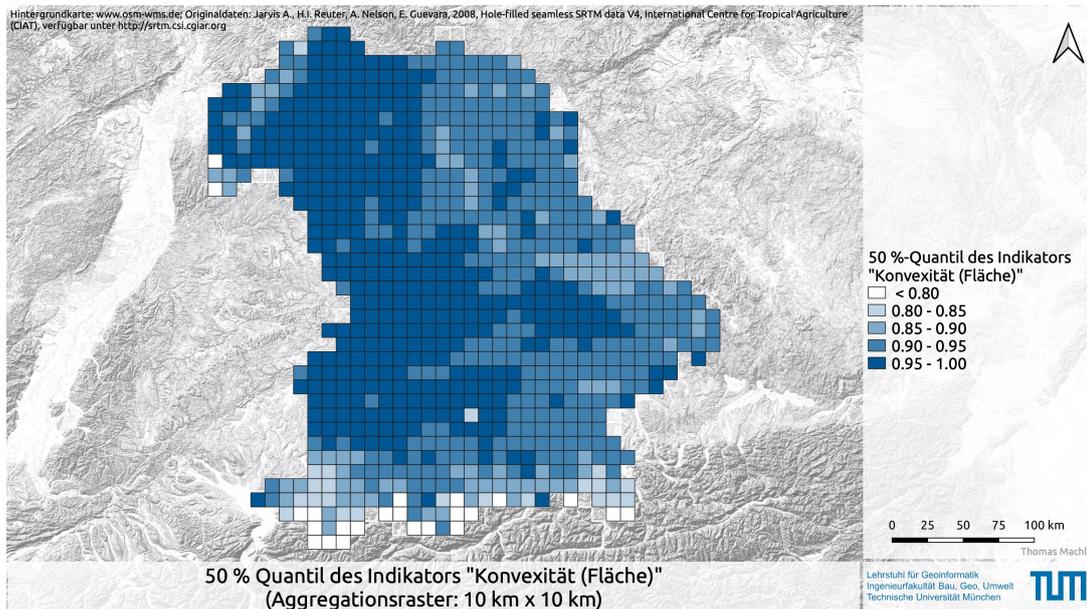


Abbildung 134: 50 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

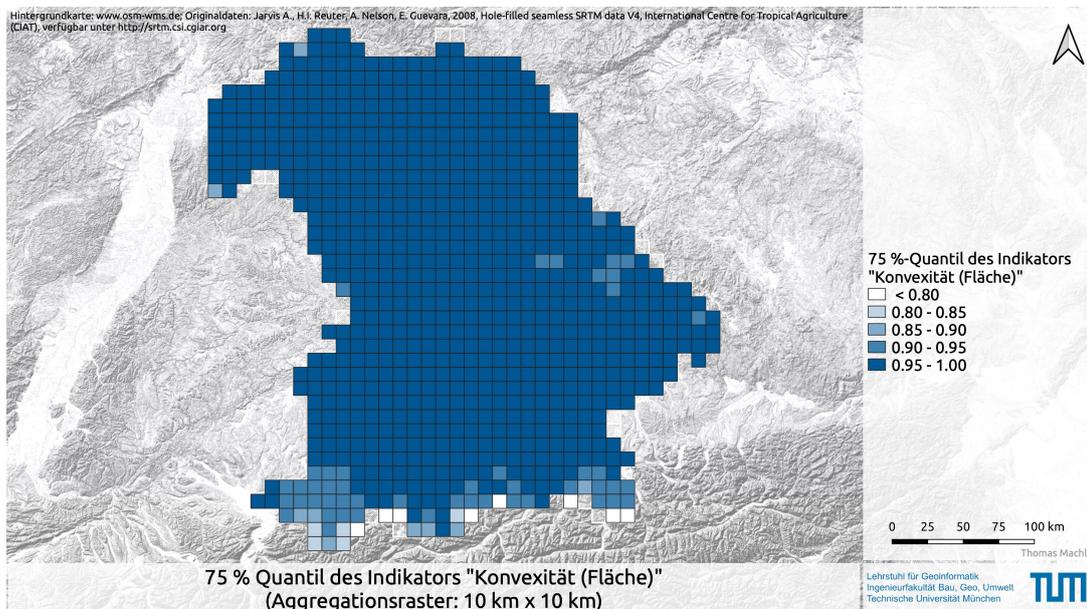


Abbildung 135: 75 %-Quantil des Indikators Konvexität (Fläche) für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

C.2.2 Indikator Rechteckigkeit

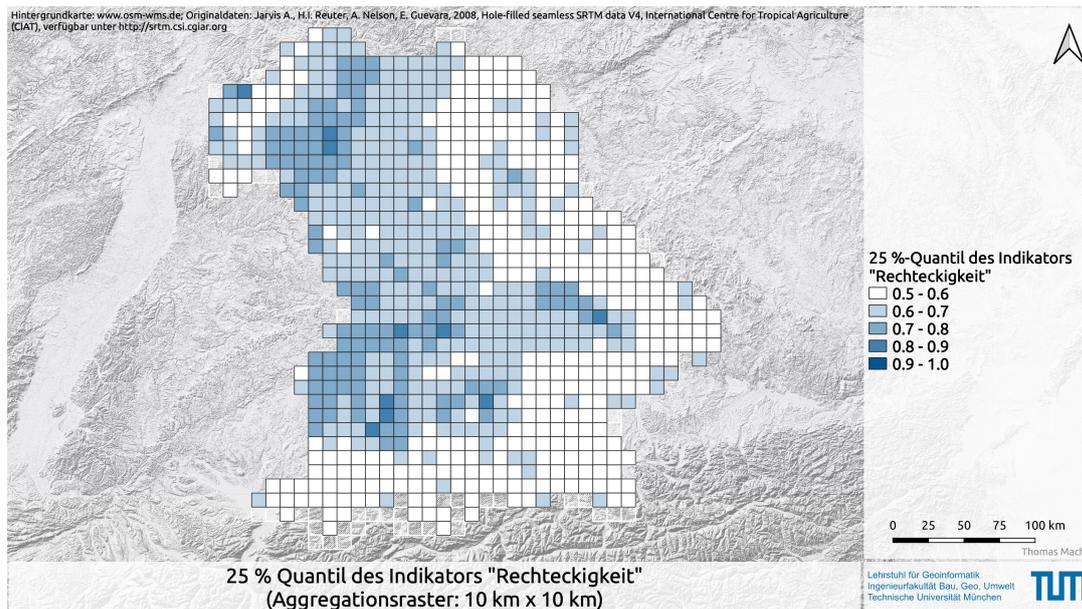


Abbildung 136: 25 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

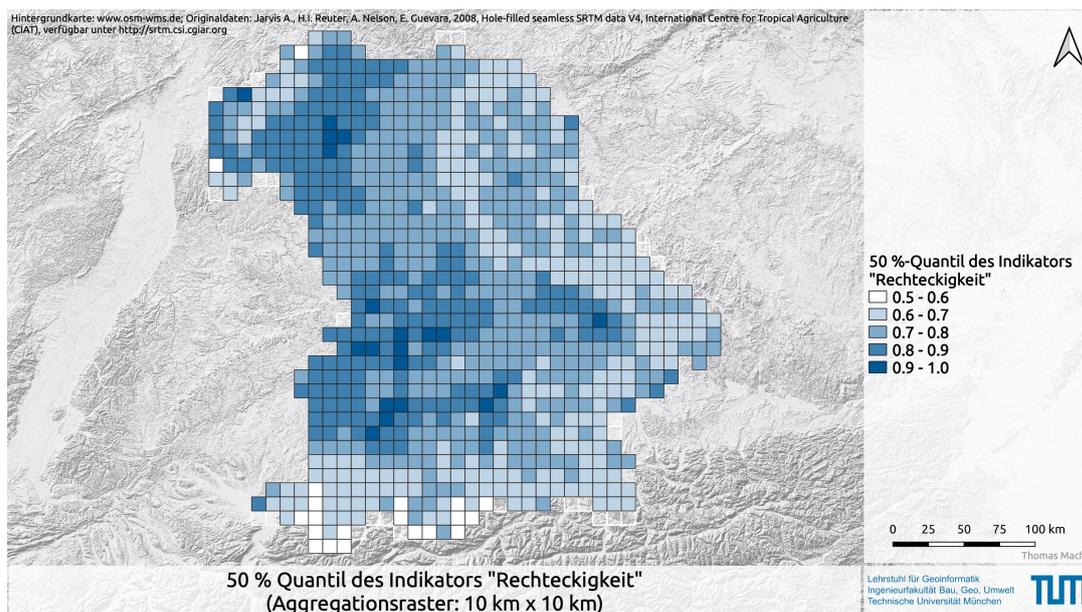


Abbildung 137: 50 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

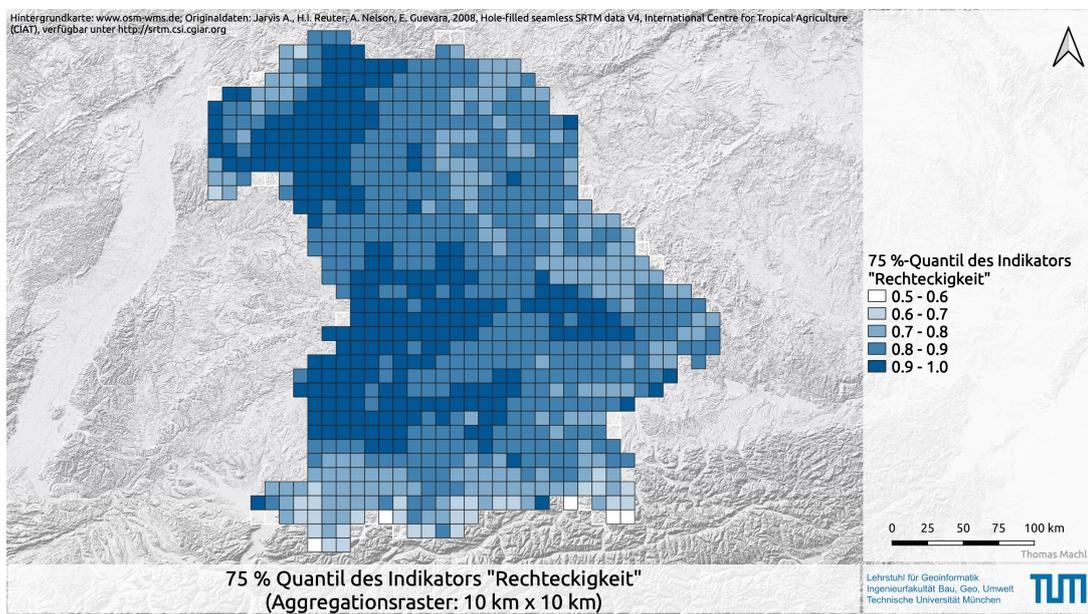


Abbildung 138: 75 %-Quantil des Indikators Rechteckigkeit für Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

C.3 Formen landwirtschaftlicher Parzellen in Bayern

- konvexes Rechteck
- konvexes Poygon hoher Rechteckigkeit
- konvexes Dreieck
- kreisförmiges Polygon
- sonstiges Polygon
- ▨ konkaves Rechteck
- ▨ konkaves Poygon hoher Rechteckigkeit
- ▨ konkaves Dreieck
- stark konkaves Polygon

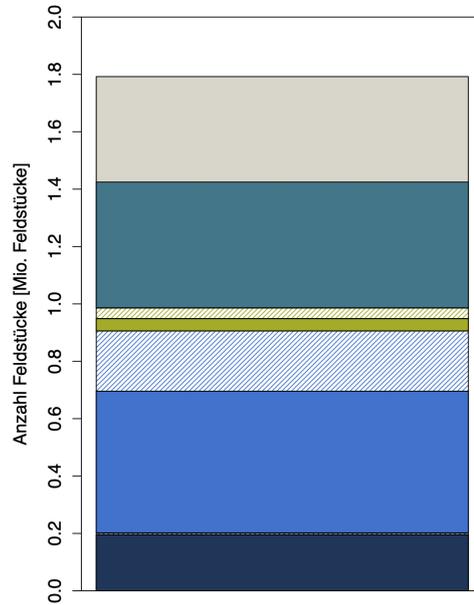


Abbildung 139: Feldstücksformen in Bayern (absolut; Stichtag: 01.06.2018)

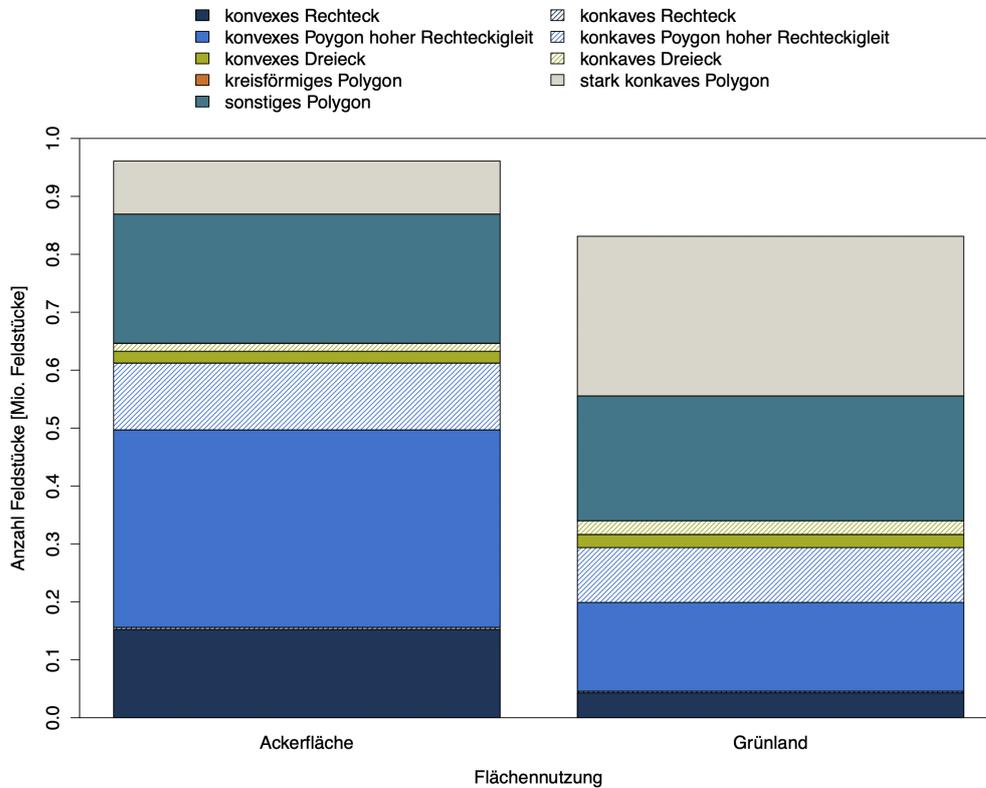


Abbildung 140: Feldstücksformen in Bayern differenziert nach Acker- und Grünlandnutzung (absolut; Stichtag: 01.06.2018)

C.4 Regionale Verteilung verschiedener Formklassen

C.4.1 Rechteckige Feldstücke

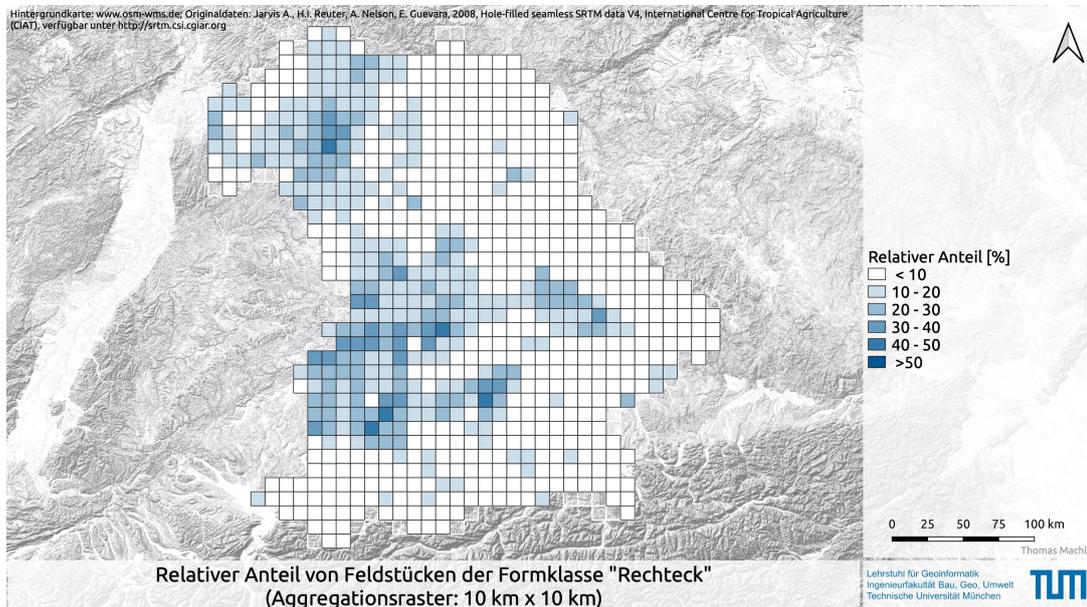


Abbildung 141: Relative Anteile rechteckiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018); als rechteckig gelten in der Darstellung *konvexe* und *konkave Rechtecke*

C.4.2 Feldstücke mit einem hohen Grad der Rechteckigkeit

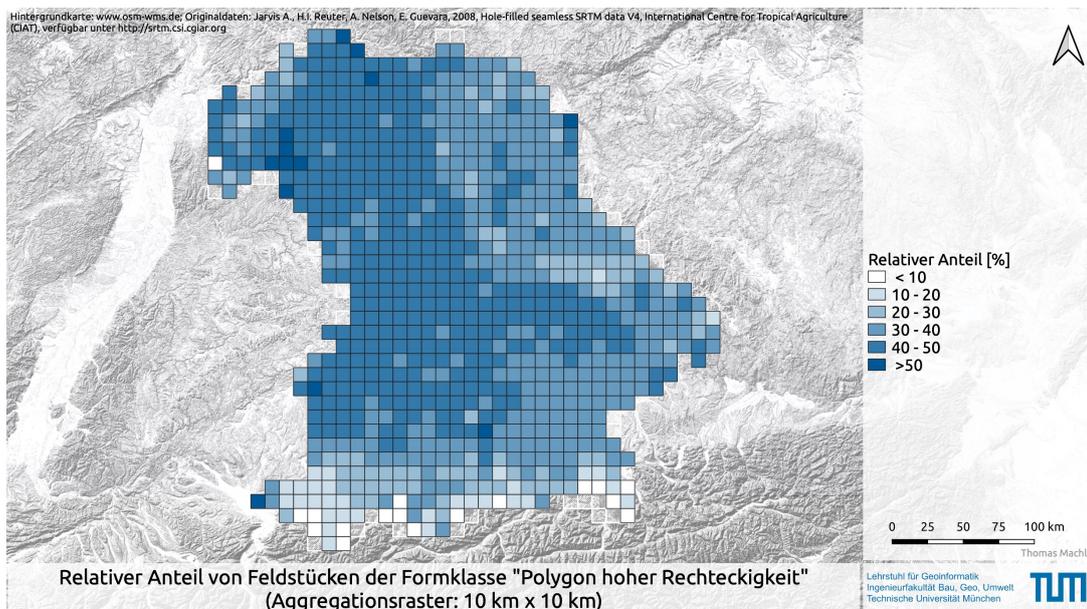


Abbildung 142: Relative Anteile von Feldstücken mit hohem Grad der Rechteckigkeit (Stichtag: 01.06.2018); als Feldstücke mit hohem Grad der Rechteckigkeit gelten in der Darstellung *konvexe* und *konkave Polygone hoher Rechteckigkeit*

C.4.3 Dreieckige Feldstücke

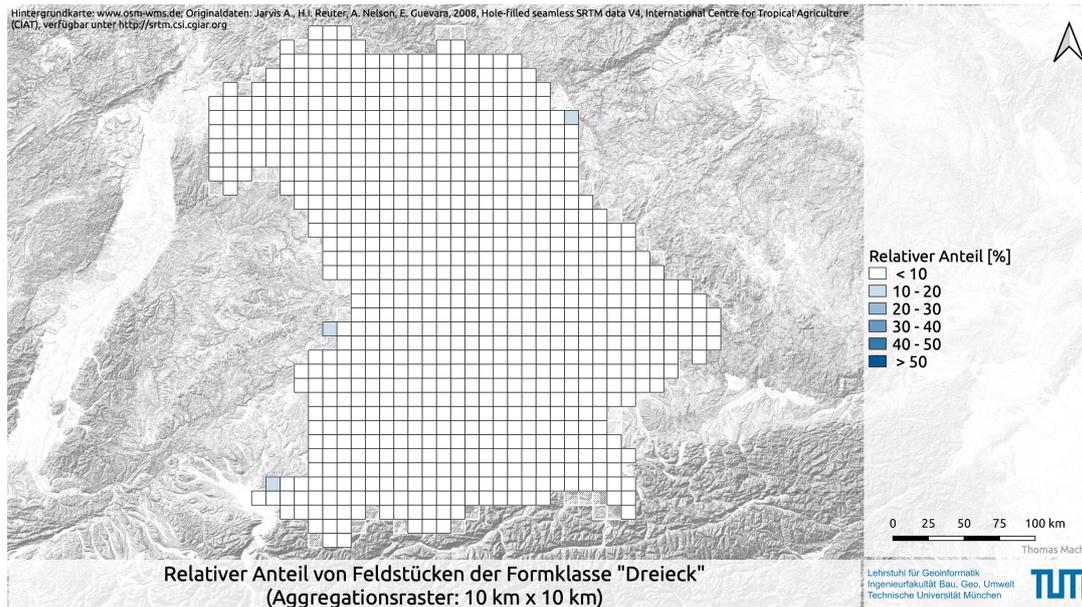


Abbildung 143: Relative Anteile dreieckiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018); Dreiecke gelten in der Darstellung *konvexe* und *konkave Dreiecke*

C.4.4 Sonstige konvexe Feldstücke

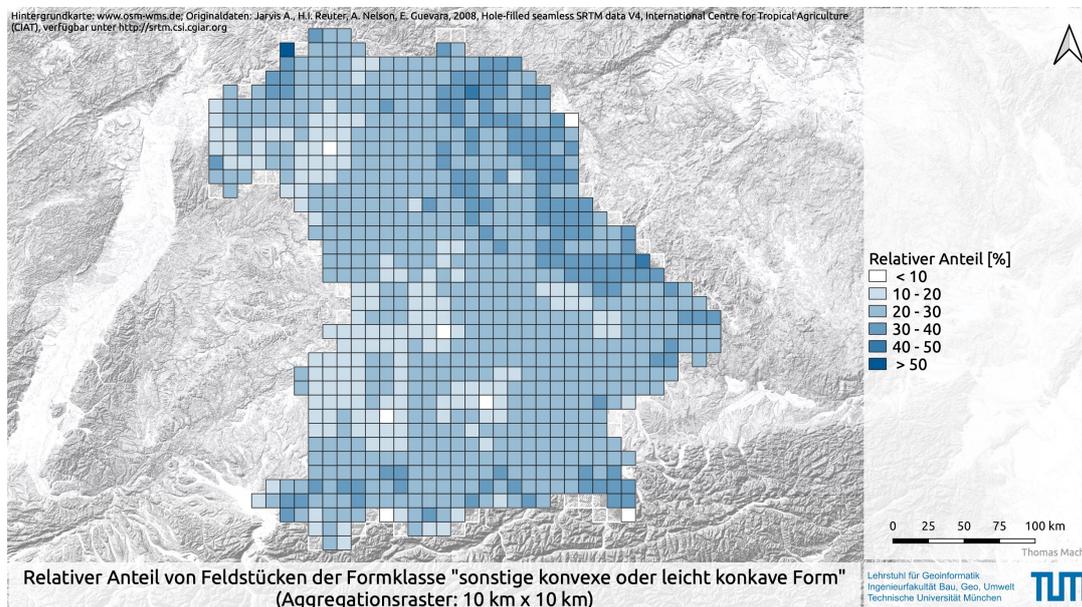


Abbildung 144: Relative Anteile sonstiger, konvex geformter Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)

C.4.5 Kreisförmige Feldstücke

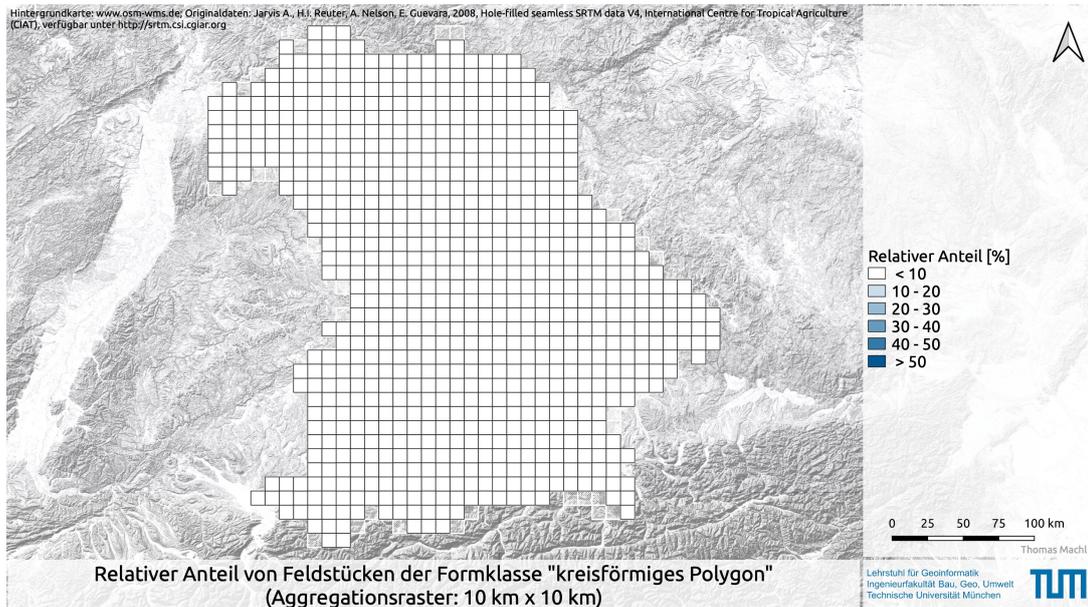


Abbildung 145: Relative Anteile kreisförmiger Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)

C.4.6 Sonstige stark konkave Feldstücke

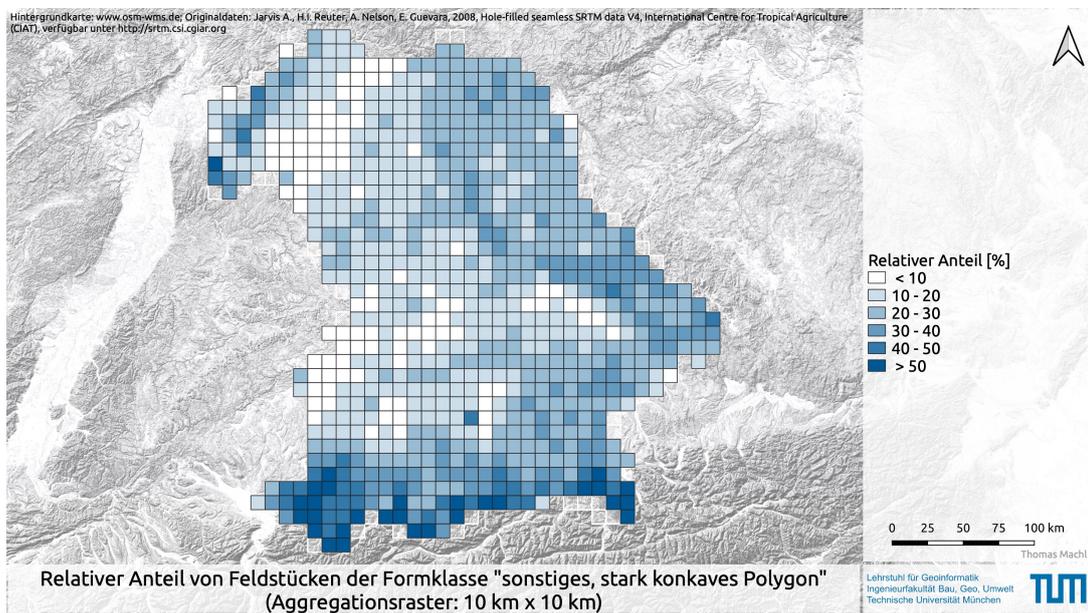


Abbildung 146: Relative Anteile stark konkaver Feldstücke (Stichtag: 01.06.2018)

C.5 Parametrische Beschreibung der Form von Parzellen

C.5.1 Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Parzellen

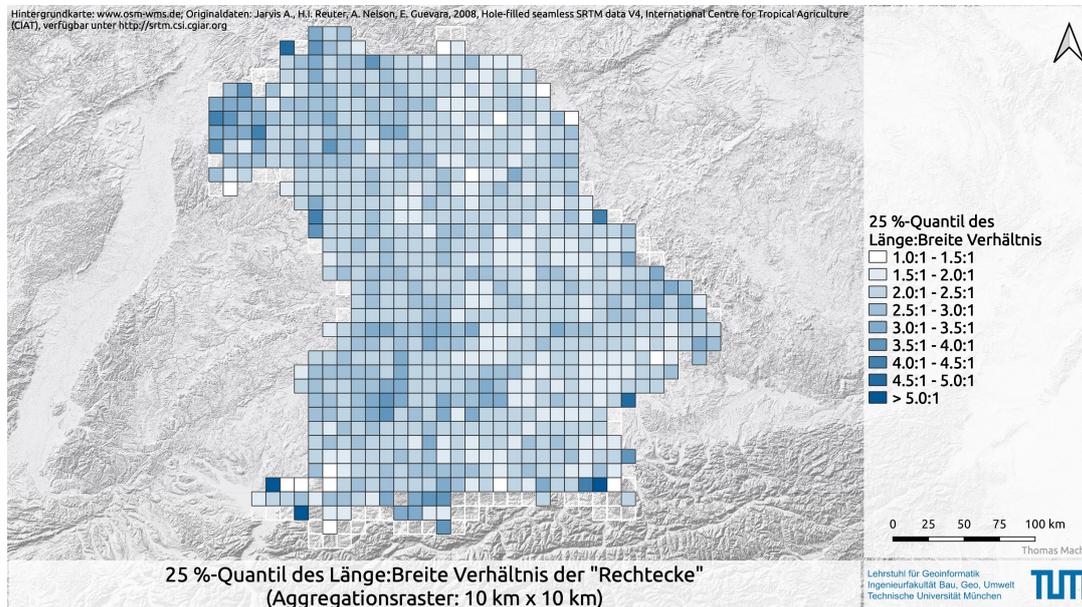


Abbildung 147: 25 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

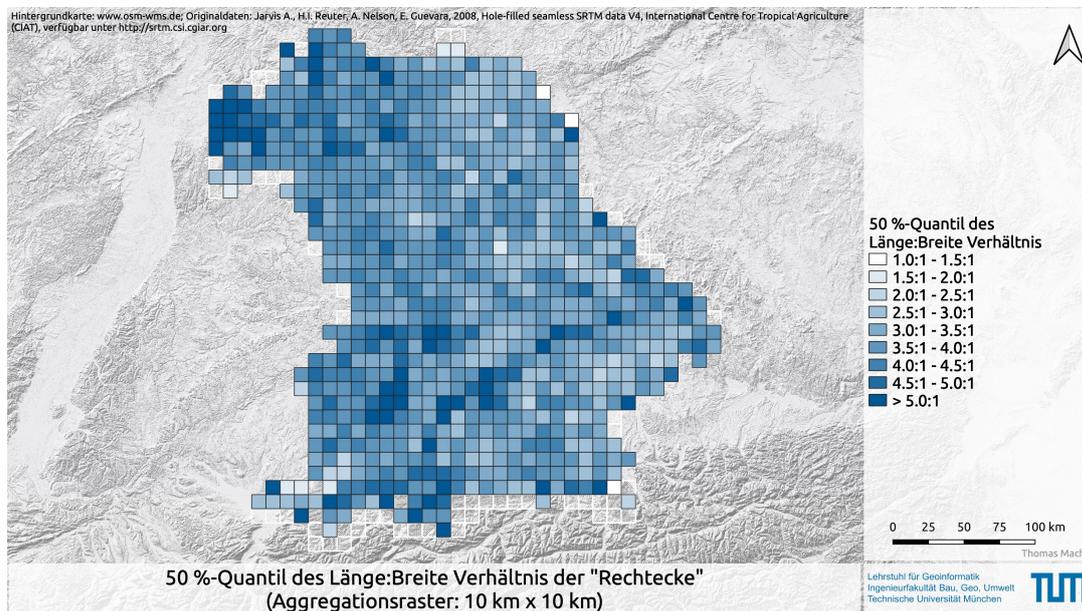


Abbildung 148: 50 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

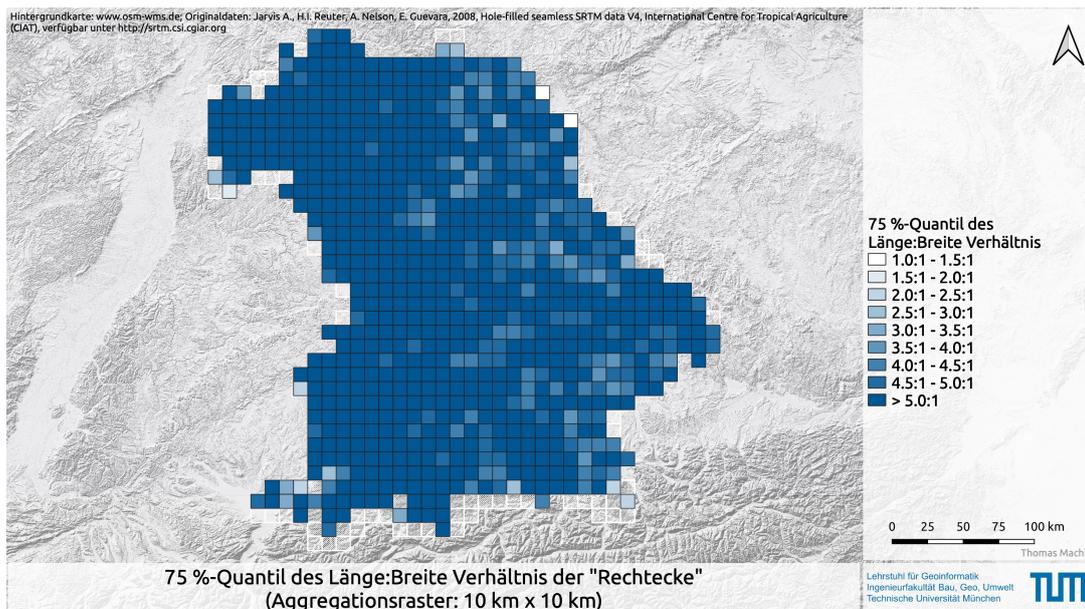


Abbildung 149: 75 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechteckiger Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

C.5.2 Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Parzellen

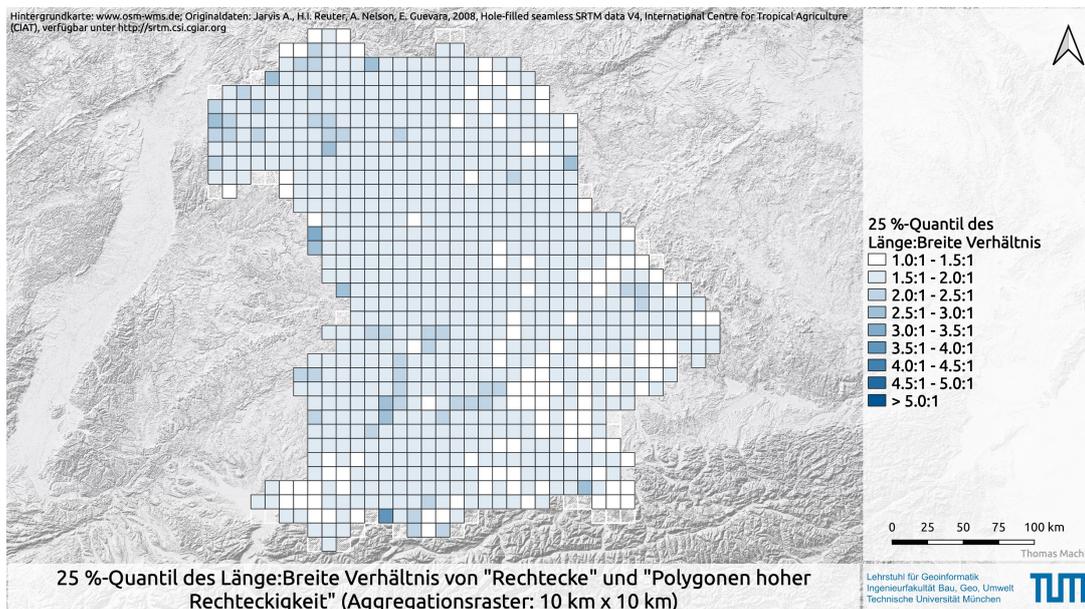


Abbildung 150: 25 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit

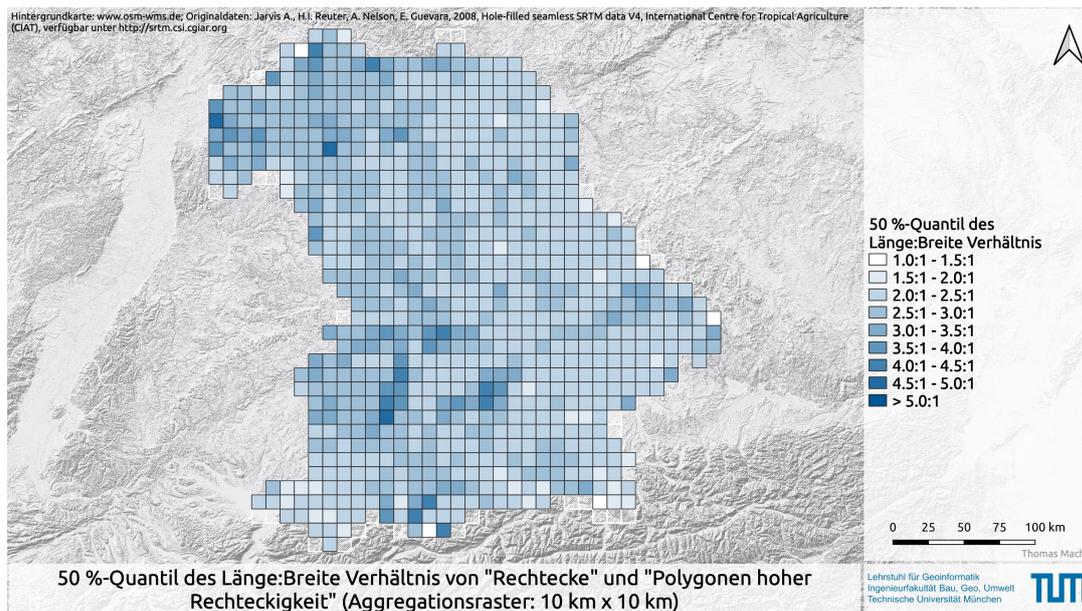


Abbildung 151: 50 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit

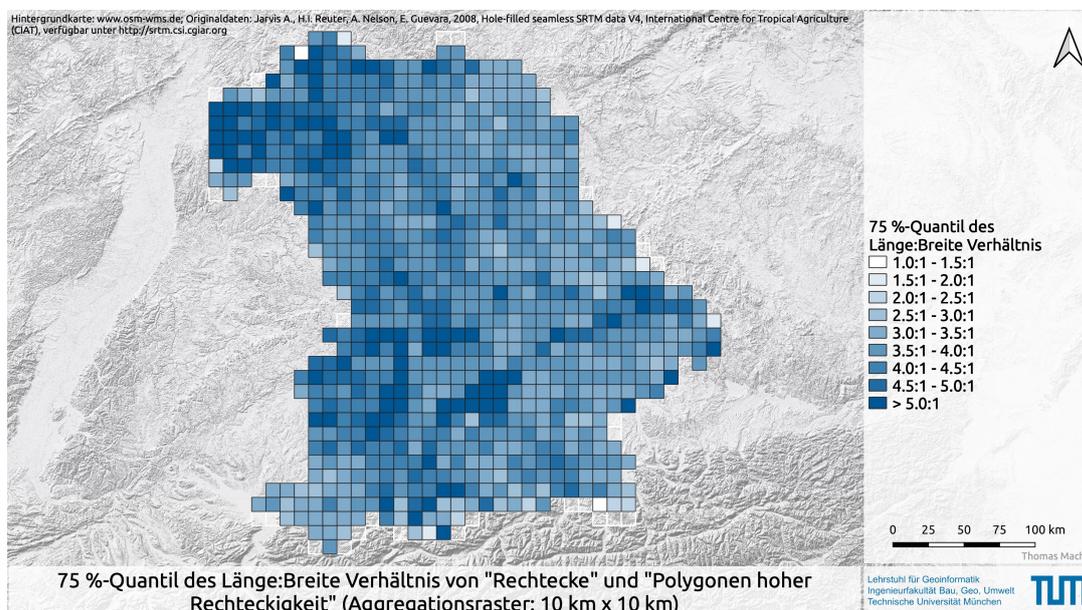


Abbildung 152: 75 %-Quantil des Länge : Breite Verhältnis rechtecksähnlicher Feldstücke aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018); als rechtecksähnlich gelten in der Darstellung neben konvexen und konkaven Rechtecken auch konvexe und konkave Polygone hoher Rechteckigkeit

D Transportpfade in der Landwirtschaft

D.1 Hof-Feld-Transportentfernungen bei Ackerparzellen

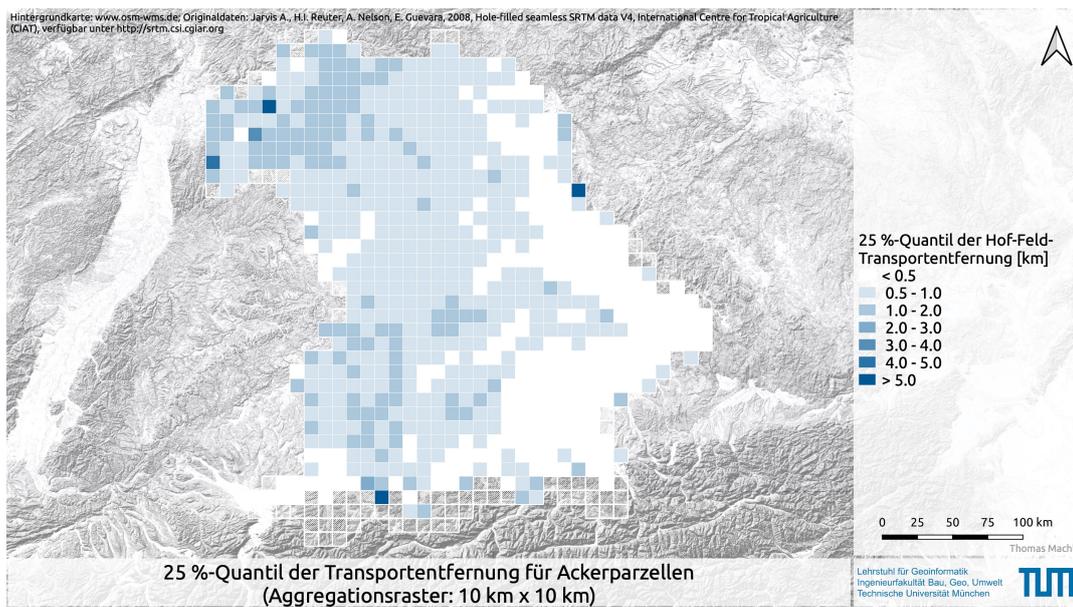


Abbildung 153: 25 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

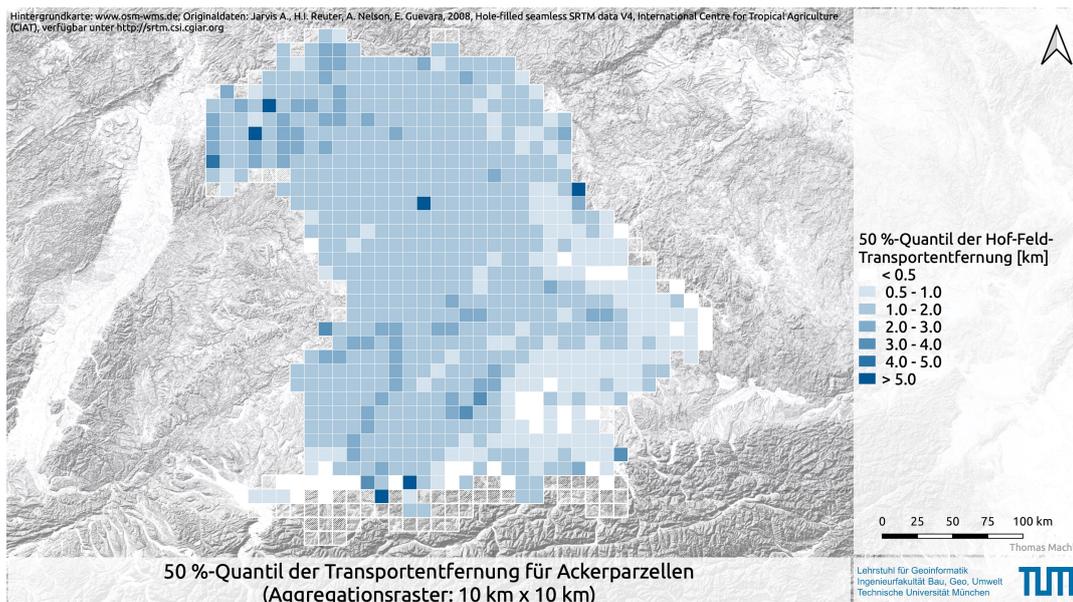


Abbildung 154: 50 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

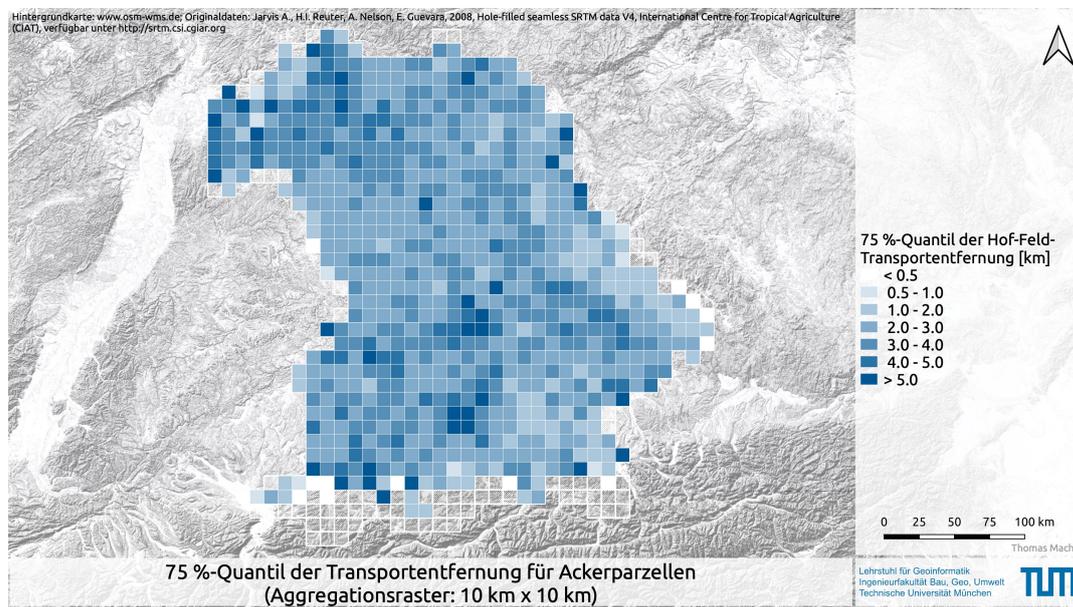


Abbildung 155: 75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Ackerflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

D.2 Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandparzellen

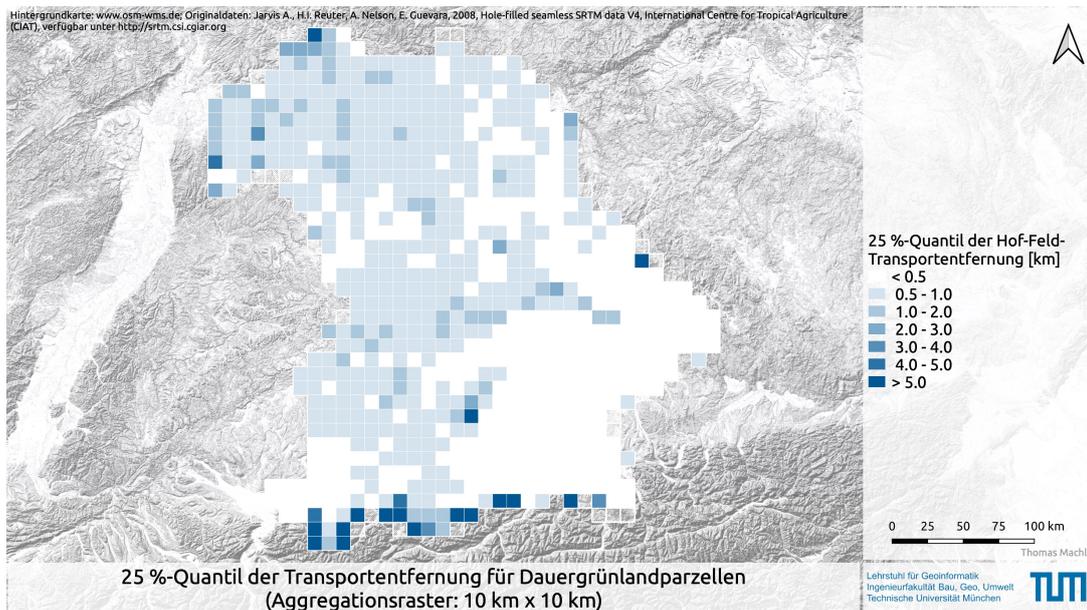


Abbildung 156: 25 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

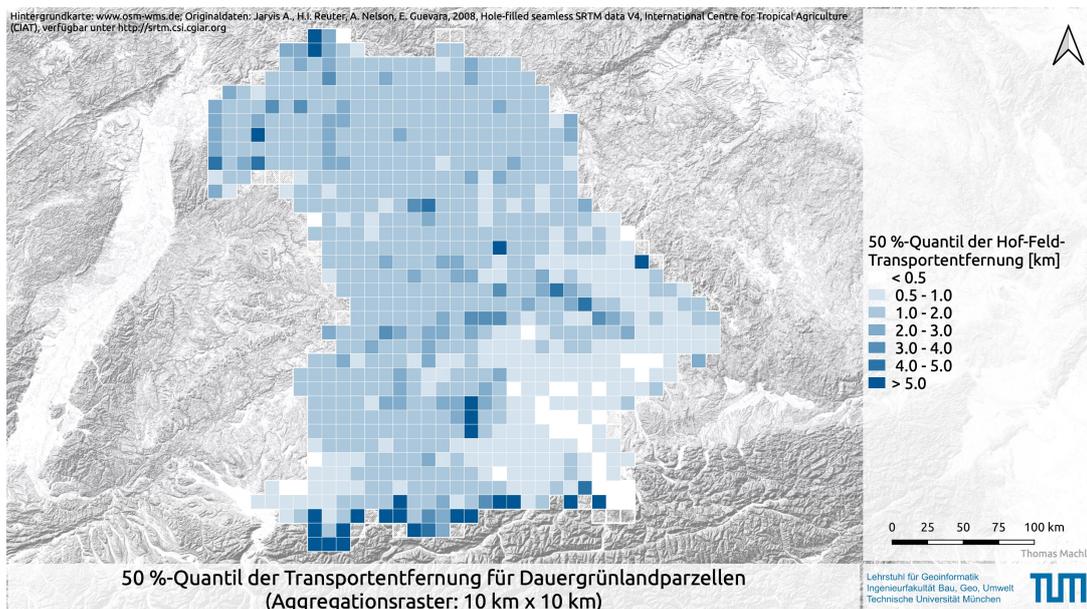


Abbildung 157: 50 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

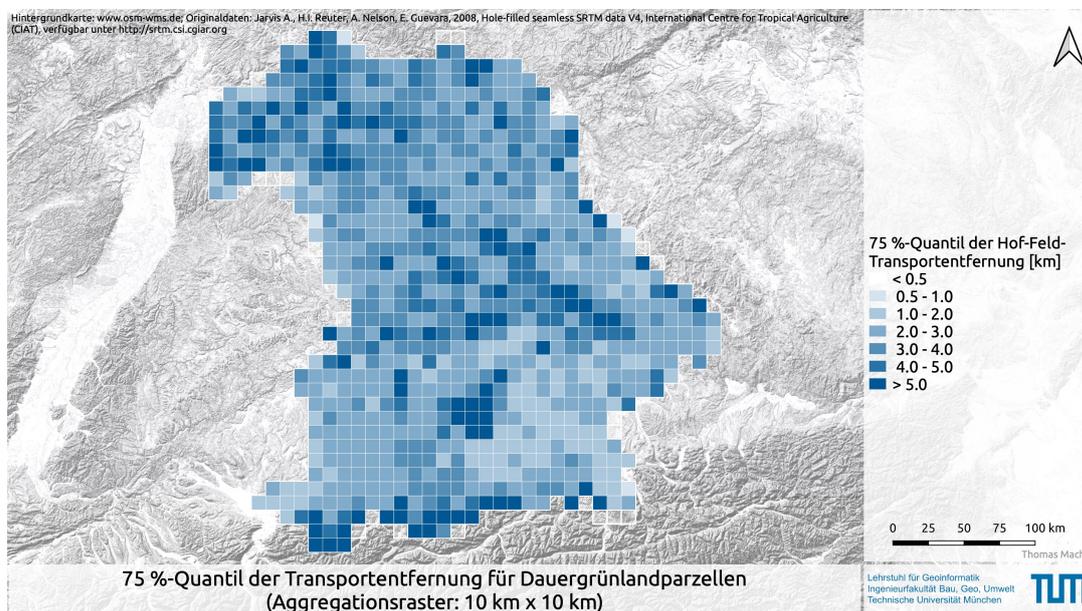


Abbildung 158: 75 %-Quantil der Hof-Feld-Transportentfernungen für Grünlandflächen aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

E Verkehrserschließung von Feldstücken

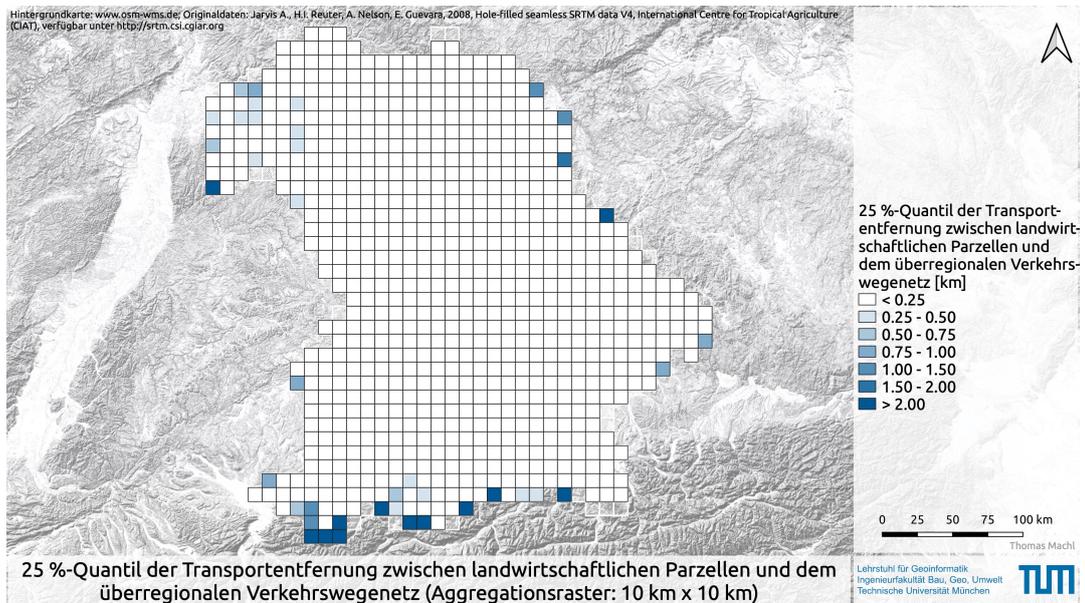


Abbildung 159: 25 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

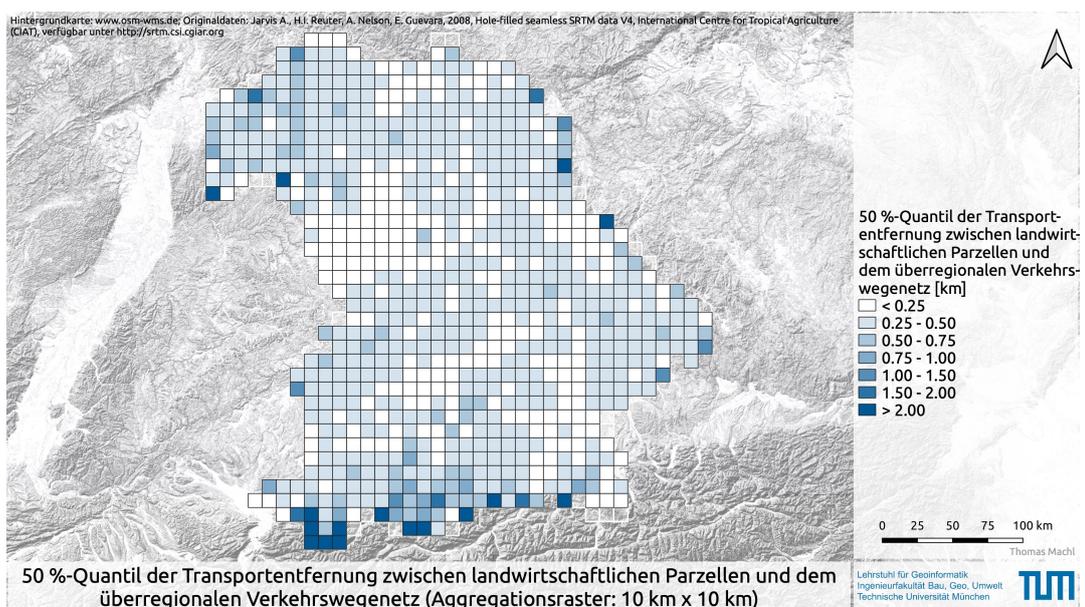


Abbildung 160: 50 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

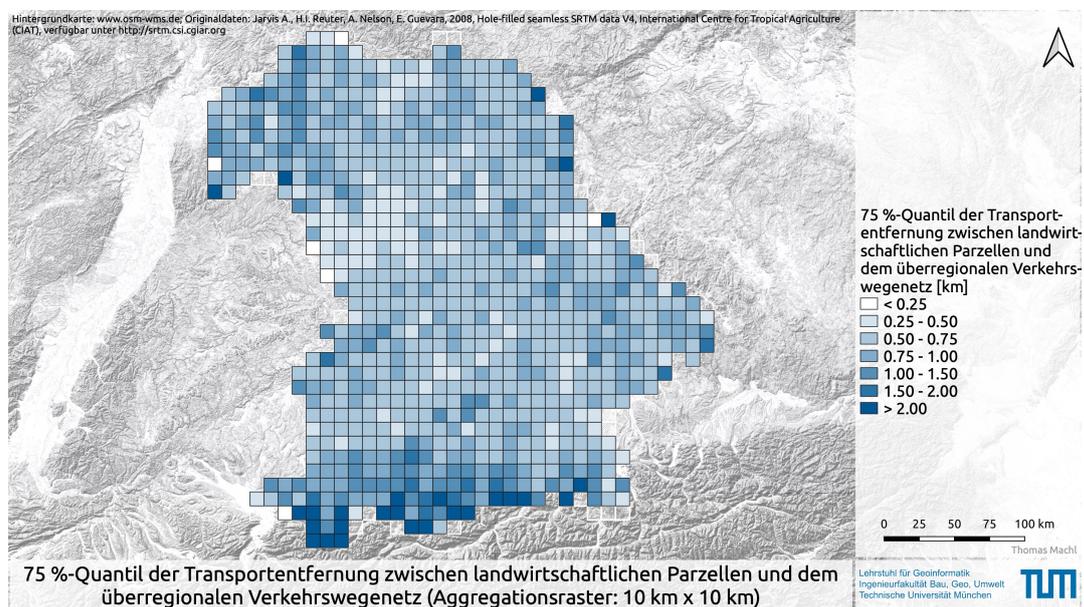


Abbildung 161: 75 %-Quantil der Transportentfernungen zwischen Feldstücken und dem überörtlichen Verkehrsnetz aggregiert auf einem 10 km x 10 km Raster (Stichtag: 01.06.2018)

F Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die bei der promotionsführenden Einrichtung Ingenieur-fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

*Entwicklung eines raumzeitlichen Informationsmodells
zur Analyse der Kulturlandschaft und
ihrer zeitlichen Veränderung*

am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München unter der Anleitung und Betreuung durch Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Ab. 6 und 7 Satz 2 angebotenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht, oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben und bin nicht in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Die öffentlich zugängliche Promotionsordnung der TUM ist mir bekannt, insbesondere habe ich die Bedeutung von § 28 (Nichtigkeit der Promotion) und § 29 (Entzug des Doktorgrades) zur Kenntnis genommen. Ich bin mir der Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung bewusst.

Gut Hollern, den 19. April 2020

Thomas Machl

Literaturverzeichnis

- AdV (2008). Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) - ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM Version 6.0. URL: <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/binarywriterservlet?imgUid=56243fd2-1153-911a-3b21-718a438ad1b2&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111&isDownload=true>.
- (2009). Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok)- Hauptdokument Version 6.0.1. URL: <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/binarywriterservlet?imgUid=42b23fd2-1153-911a-3b21-718a438ad1b2&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111&isDownload=true>.
- (2014). Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) - Erläuterungen zum ATKIS® Basis-DLM Version 6.0.1. URL: <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/binarywriterservlet?imgUid=d53eba65-9ac0-41f8-4010-34072e13d633&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>.
- Aktas, M. A. (2012). Shape Descriptors. Dissertation. University of Exeter.
- Allen, J. F. (1983). Maintaining Knowledge About Temporal Intervals. In: *Communications of the ACM* 26.11, S. 832–843.
- ALRSH, Bauernverband Schleswig-Holstein e.V. und Schleswig-Holsteiner Gemeindegtag (2008a). Wege mit Aussichten - Studie zur Zukunftsfähigkeit des ländlichen Wegenetzes in Schleswig-Holstein (Teil A: Abschlussbericht). URL: www.alr-sh.de/fileadmin/download/Wege_mit_Aussichten/Teil_A_Abschlussbericht_01.pdf.
- (2008b). Wege mit Aussichten - Studie zur Zukunftsfähigkeit des ländlichen Wegenetzes in Schleswig-Holstein (Teil B: Untersuchung der Beispielgemeinden). URL: http://www.alr-sh.de/fileadmin/download/Wege_mit_Aussichten/Teil_B_Beispielgemeinden.pdf.
- Ammar, M., K. Baiche, S. Mahmoudi und M. Benazzouz (2017). Shape irregularity based area measurement: Application on cell nucleus recognition. In: *Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), 2017 5th International Conference on*. IEEE, S. 1–6.
- Arkin, E. M., P. L. Chew, D. P. Huttenlocher, K. Kedem und J. Mitchell (1991). An Efficiently Computable Metric for Comparing Polygonal Shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13, S. 209–216.
- Aslan, S. T. A., K. S. Gundogdu und I. Arici (2007). Some metric indices for the assessment of land consolidation projects. In: *Pakistan journal of biological sciences: PJBBS* 10.9, S. 1390–7.
- Astner, C. (2017). Untersuchung eines neuen Planungsansatzes zur Konzeption überregionaler Kernwegenetze für die Landwirtschaft. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- (2018). Erstellung eines Geodesign-Werkzeugs zur naturschutzfachlichen Bewertung beim Entwurf von Kernwegenetzen. Projektarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- Auburger, S. und E. Bahrs (2016). GIS basierte Modellierung von Transportdistanzen für Wirtschaftsdünger im Kontext der zu novellierenden Düngeverordnung. In: *Informatik in*

- der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Fokus: Intelligente Systeme - Stand der Technik und neue Möglichkeiten, Referate der 36. GIL-Jahrestagung, 22.-23. Februar 2016, Osnabrück, Germany.* Hrsg. von A. Ruckelshausen, A. Meyer-Aurich, T. Rath, G. Recke und B. Theuvsen. Bd. 253. LNI. GI, S. 21–24.
- Auerswald, K. (2002). Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen. In: *Landnutzung und Landentwicklung* 43, S. 1–5.
- Basaraner, M. und S. Cetinkaya (2017). Performance of shape indices and classification schemes for characterising perceptual shape complexity of building footprints in GIS. In: *International Journal of Geographical Information Science* 31.10, S. 1952–1977.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2015). Hecken, Feldgehölze und Feldraine in unserer Landschaft. Hrsg. von Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Bd. 1. Selbstverlag.
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2019). Bayern Daten 2018. Bayerisches Landesamt für Statistik.
- BayStMELF (2016). Bayerischer Agrarbericht 2016: Pachtverhältnisse. URL: <http://www.agrarbericht-2016.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/pachtverhaeltnisse.html>.
- BayStMELF und BayStMUV (2017). Entwicklungsprogramme für den Ländlichen Raum des Landes Bayern 2014 - 2020. Version 3.1.
- BBV Landsiedlung (2014). Konzept für ein Kernwegenetz im Gebiet der Interkommunalen Allianz Fränkischer Süden. URL: http://www.fraenkischer-sueden.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Abgeschlossene_Projekte/2014_Konzept_fuer_ein_Kernwegenetz_im_Gebiet_der_Interkommuna.pdf.
- Bernhardt, H. (2002). Schüttguttransport in landwirtschaftlichen Betrieben Deutschlands. Dissertation. Universität Gießen.
- Bernhardt, H., N. Fröba, H. Knechtges und K. Kühnbach (2005). Landwirtschaftliche Transporte und Entwicklungstendenzen. In: *Landwirtschaftliche Wege*. Hrsg. von K. Kühnbach. KTBL.
- Bernhardt, H. und G. Weise (2001). Transportmengen in der Landwirtschaft. In: *Landtechnik* 56.1, S. 16–17.
- Bertling, H., H. Kriese und H. Lütke-meier (2015). Neue Planungsansätze im ländlichen Wegebau. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 140.5, S. 320–326.
- Bill, R. (2016). Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 6. Auflage. Berlin: Wichmann Verlag.
- BKG (2013). Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung). URL: <https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/8479/basis-dlm-aaa.pdf>.
- BMEL (2015). Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2015. URL: <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Agrarbericht2015.pdf>.
- (2020). Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2019. Hrsg. von Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Bd. 63. Landwirtschaftsverlag.
- Bromma, R. (2014). Konzeption und Umsetzung eines ländlichen Kernwegenetzes in der Allianz 'Fränkischer Süden'. In: *Mitteilungen des DVW-Bayern e.V., Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 66.4, S. 379–389.
- Brunner, H. (2014). Vielfalt erhalten. Zukunft gestalten - Der Bayerische Weg in der Land- und Forstwirtschaft; Regierungserklärung. StMELF.
- Brunotte, J. und N. Fröba (2007). Schlaggestaltung, kostensenkend und bodenschonend. KTBL-Schrift ; 460. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

- Burger, W. und M. J. Burge (2013). Fourier Shape Descriptors. In: *Principles of Digital Image Processing: Advanced Methods*. London: Springer London, S. 169–227.
- Charvat, K. (2019). Agriculture DWG Report.
- Chaturvedi, K. und T. H. Kolbe (2015). Dynamizers - Modeling and implementing dynamic properties for semantic 3D city models. In: *3rd Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*. TU Delft; Eurographics. Delft, The Netherlands.
- (2016). Integrating Dynamic Data and Sensors with Semantic 3D City Models in the context of Smart Cities. In: *Proceedings of the 11th International 3D Geoinfo Conference*. Hrsg. von E. Dimopoulou und P. van Oosterom. Bd. IV-2/W1. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Athens, Greece: ISPRS.
- Chaturvedi, K., C. S. Smyth, G. Gesquière, T. Kutzner und T. H. Kolbe (2015). Managing versions and history within semantic 3D city models for the next generation of CityGML. In: *Selected papers from the 3D Geoinfo 2015 Conference*. Hrsg. von A. A. Rahman. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Kuala Lumpur, Malaysia: Springer.
- Chaturvedi, K., B. Willenborg, M. Sindram und T. H. Kolbe (2017). Solar Potential Analysis and Integration of the Time-dependent Simulation Results for Semantic 3D City Models Using Dynamizers. In: *Proceedings of the 12th International 3D Geoinfo Conference 2017*. Hrsg. von M. Kalantari und A. Rajabifard. Bd. IV-4/W5. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. University of Melbourne. Melbourne, Australia: ISPRS, S. 25–32.
- Chéné, Y., D. Rousseau, É. Belin, M. Garbez, G. Galopin und F. Chapeau-Blondeau (2016). Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor. In: *Machine Vision and Applications 27.4*, S. 447–461.
- Claramunt, C. und M. Thériault (1995). Managing Time in GIS: An Event-Oriented Approach. In: *Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases: Recent Advances in Temporal Databases*. London, UK, UK: Springer-Verlag, S. 23–42.
- da Fontoura Costa, L. und R. Marcondes Cesar (2001). Shape analysis and classification - theory and practice. Image processing series. Boca Raton: CRC Press.
- Del Mondo, G., A. Rodriguez, C. Claramunt, L. Bravo und R. Thibaud (2013). Modeling consistency of spatio-temporal graphs. In: *Data & Knowledge Engineering 84*, S. 59–80.
- Del Mondo, G., J. G. Stell, C. Claramunt und R. Thibaud (2010). A Graph Model for Spatio-temporal Evolution. In: *Journal of Universal Computer Science 16.11*, S. 1452–1477.
- Demetriou, D., L. See und J. Stillwell (2013a). A Parcel Shape Index for Use in Land Consolidation Planning. In: *Transactions in GIS 17.6*, S. 861–882.
- Demetriou, D., J. Stillwell und L. See (2013b). A new methodology for measuring land fragmentation. In: *Computers Environment and Urban Systems 39*, S. 71–80.
- Demmel, M. (2006). Traktoren und Transporttechnik. In: *Pflanzliche Erzeugung*. Bd. 12. München: BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, S. 135–165.
- (2014). Traktoren- und Transporttechnik. In: *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau*. Bd. 13. München: BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, S. 151–170.
- Diemann, R. (2001). Schlagstruktur und Schlaggröße im Spannungsfeld gegensätzlicher Interessen. In: *Landnutzung und Landentwicklung 42.3*, S. 138–139.
- Diepenbrock, W. (2016). Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Hrsg. von F. Ellmer und J. Leon. 4., überarbeitete Auflage. UTB. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Dietzel, H., R. Diemann, R. Jacobs und R. Otto (2000). Schlaggröße und Schlagformen in Ackerbaugebieten der neuen Bundesländer. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 41*, S. 68–73.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik 1.1*, S. 269–271.
- DLKG (2016). Flächenkonkurrenz entschärfen: gemeinsam - maßvoll - zukunftsfähig. Bd. 14. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft. DLKG.

- DLKG (2017). *Idylle Ländlicher Raum? – Der Kampf um die Fläche*. Bd. 15. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft. DLKG. (Besucht am).
- Döring, G., A. Schilcher, M. Strobl, R. Schleicher, M. Seidl und J. Mitterleitner (2010). Verfahren zum Transport von Biomasse. In: *Biogas Forum Bayern*. 2.
- Duttmann, R., J. Brunotte und M. Bach (2013). Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen für den Praktiker. In: *Landbauforschung* 63.2, S. 171–190.
- DWA (2016). Arbeitsblatt DWA-A 904-1: Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW) Teil 1: Richtlinien für die Anlage und Dimensionierung Ländlicher Wege. Hrsg. von *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V.* (DWA).
- Eisenhut, C. und T. Kutzner (2010). Vergleichende Untersuchungen zur Modellierung und Modelltransformation in der Region Bodensee im Kontext von INSPIRE. In: *INSPIRE-GMES-Informationsbroschüre*. Hrsg. von M. Schilcher. 6. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Technische Universität München, Geodätisches Institut, S. 34.
- Engelhardt, H. (2004). Auswirkungen von Flächengröße und Flächenform auf Wendezeiten, Arbeitserledigung und verfahrenstechnische Maßnahmen im Ackerbau. Dissertation. Justus Liebig Universität Gießen.
- Erwig, M. und M. Schneider (1999). The Honeycomb Model of Spatio-Temporal Partitions. In: *In Int. Workshop on Spatio-Temporal Database Management, LNCS 1678*. Springer-Verlag, S. 39–59.
- Europäischer Rechnungshof (2016). Sonderbericht: Das System zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen: ein nützliches Instrument zur Bestimmung der Beihilfefähigkeit landwirtschaftlicher Flächen, dessen Verwaltung allerdings noch verbessert werden könnte. URL: www.eca.europa.eu/Lists/News/NEWS1610_25/SR_LPIS_DE.pdf.
- Europäisches Parlament und Rat (2013). Verordnung (EU) Nr. 1305/2013. Europäisches Parlament und Rat.
- Fan, H. (2010). Integration of time-dependent features within 3D city model. Dissertation. München: Technische Universität München.
- Fehres, J. (2007). LandEntwicklungsFachInformationsSystem LEFIS. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 132.1, S. 11–15.
- Feldwisch, N., D. Meyer-Marquart, K. Müller-Pfannenstiel, R. Sigl und A. Müller (2000). Kriterienkatalog zur Gestaltung von Ackerschlägen im Agrarraum - Landschaftsökologische Aspekte. URL: https://www.natur.sachsen.de/download/endbericht_acker.pdf.
- Fina, S. (2011). Flächenverbrauch und Landschaftszersiedelung - Wo steht Deutschland im internationalen Vergleich? In: *Flächennutzungsmonitoring III. Erhebung – Analyse – Bewertung*. Hrsg. von G. Meinel und U. Schumacher. IÖR Schriften 58. Rhombos, S. 11–21.
- Fischl, G. (2015). Werkzeuge zur Dekomposition komplexer Parzellengeometrien und zur Abschätzung von Fahrwegen. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- FNR (2015). Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. Hrsg. von Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Eigenverlag.
- Forschungsgruppe Agrar- und Regionalentwicklung Triesdorf (2013). Evaluation der Berglandwirtschaft einschließlich der Alm- und Alpwirtschaft in Bayern. URL: https://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/landwirtschaft/dateien/abschlussbericht_berglanidwirtschaft.pdf.
- Friebe, R. (2018). InVeKoS-Flächenentzug in den Jahren 2008 bis 2017. Hrsg. von Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). URL: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/invekos-flaechenentzug-2008-2017_lfl-information.pdf.

- Fröba, N. (1994). Landwirtschaftliches Transportwesen. In: *Landtechnik – Agricultural Engineering* 49.5, S. 264–266.
- Fröba, N. und M. Funk (2004). Teilzeitspezifische Dieselbedarfskalkulation bei landwirtschaftlichen Arbeiten. In: *Landtechnik – Agricultural Engineering* 59.1, S. 38–39.
- Galton, A. (2004). Fields and Objects in Space, Time, and Space-time. In: *Spatial Cognition & Computation* 4.1, S. 39–68.
- Gantner, F., B. Waldvogel, R. Meile und P. Laube (2013). The Basic Formal Ontology as a Reference Framework for Modeling the Evolution of Administrative Units. In: *Transactions in GIS* 17.2, S. 206–226.
- Gapp, K. (2018). Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung für die Planung landwirtschaftlicher Kernwegenetze. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- Gerl, S. (2018). Verkehrswegebelaugung durch landwirtschaftlichen Verkehr. Projektarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- Gockel, R. (2010). Landwirtschaftliche Wege - eine Infrastruktureinrichtung für die Zukunft. In: *Wege in die Zukunft?! - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Hrsg. von Deutsche Landeskulturgesellschaft. Sonderheft 3. Deutsche Landeskulturgesellschaft.
- (2012). Zukunftsfähige ländliche Infrastruktur – Welche Hilfen benötigt die Landwirtschaft? In: *Wege in die Zukunft!?! - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 31–37.
- Gonzalez, X. P., C. J. Alvarez und R. Crecente (2004). Evaluation of land distributions with joint regard to plot size and shape. In: *Agricultural Systems* 82.1, S. 31–43.
- Götz, S., J. Holzer, J. Winkler, H. Bernhardt und D. Engelhardt (2011). Agrarlogistik - Systemvergleich von Transportkonzepten der Getreidelogistik. In: *Landtechnik – Agricultural Engineering* 66.5, S. 381–386.
- Gröger, G., T. H. Kolbe, C. Nagel und K.-H. Häfele, Hrsg. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard 2.0. URL: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.
- Gutberlet, M. (2012). Ansprüche an Qualität und Ausbaustandards zukunftsorientierter Wegenetze. In: *Wege in die Zukunft!?! - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 53–58.
- Haber, W. (1996). Bedeutung unterschiedlicher Land- und Forstbewirtschaftung für die Kulturlandschaft — einschließlich Biotop- und Artenvielfalt. In: *Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft: Expertisen*. Hrsg. von G. Linckh, H. Sprich, H. Flaig und H. Mohr. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–26.
- (2014). Landwirtschaft und Naturschutz. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag.
- (2016). Flächenansprüche – Wie erfüllt man wachsende Ansprüche an begrenzte Landflächen? In: *Flächenkonkurrenz entschärfen: gemeinsam - maßvoll - zukunftsfähig*. Hrsg. von D. Landeskulturgesellschaft. Bd. 14. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 16, S. 23–40.
- Hagspiel, N. (2016). Entwicklung eines Geodesign-Werkzeugs zur Planungsunterstützung im ländlichen Wegebau. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- Hahn, J. und N. Fröba (2013). Einführung. In: *Logistik rund um die Biogasanlage*. KTBL-Schrift 498. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., S. 9–13.
- Hendricks, A. (2017). Reduzierung der Flächeninanspruchnahme – Grundlagen. In: *Idylle Ländlicher Raum? - Der Kampf um die Fläche*. Hrsg. von D. Landeskulturgesellschaft. Bd. 15. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft, S. 17–32.

- Herrmann, A. (1995). Auswirkung der Schlaggröße auf den Arbeitszeitbedarf in der Gesamtarbeitszeit sowie auf Kosten der Arbeitserledigung. In: *Agrartechnische Berichte*. 26, S. 129–138.
- Heuser, O. E. (1952). Ackerbau. Hrsg. von O. Keune. Landbuch-Verlag, S. 102–124.
- Hornsby, K. und M. J. Egenhofer (2000). Identity-based change: a foundation for spatio-temporal knowledge representation. In: *International Journal of Geographical Information Science* 14.3, S. 207–224.
- Hosse, K. (2005). Objektorientierte Modellierung und Implementierung eines temporalen Geoinformationssystems für kulturelles Erbe. Dissertation. München: Technische Universität München.
- Hu, M.-K. (1962). Visual pattern recognition by moment invariants. In: *IRE transactions on information theory* 8.2, S. 179–187.
- Hubbard, S. und K. Hornsby (2011). Modeling Alternative Sequences of Events in Dynamic Geographic Domains. In: *Transactions in GIS* 15.5, S. 557–575.
- Inan, H. I., V. Sagris, W. Devos, P. Milenov, P. van Oosterom und J. Zevenbergen (2010). Data model for the collaboration between land administration systems and agricultural land parcel identification systems. In: *Journal of Environmental Management* 91.12, S. 2440–2454.
- INSPIRE (2014). D2.5: Generic Conceptual Model. URL: http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/D2.5_v3.4.pdf.
- INSPIRE Thematic Working Group Statistical Units (2013). D2.8.III.1 Data Specification on Statistical Units – Technical Guidelines. URL: http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_SU_v3.0rc3.pdf.
- ISO (2003). DIN EN ISO 19107:2003 Geographic information - Spatial schema. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.
- (2005a). DIN EN ISO 19108:2005 Geographic information - Temporal schema. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.
- (2005b). ISO/TS 19103:2005 Geographic Information - Conceptual schema language.
- (2006). DIN EN ISO 19109:2005 Geographic information - Rules for application schema. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.
- (2012). DIN EN ISO 19148:2012 Geographic information – Linear referencing. Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.
- (2013). DIN EN ISO 19152:2013 Geographic information - Land Administration Domain Model (LADM). Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH.
- Jiao, L., Y. Liu und H. Li (2012). Characterizing land-use classes in remote sensing imagery by shape metrics. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 72.0, S. 46–55.
- Joshi, N., A. E. Matthias Baumann and, R. Fensholt, K. Grogan, P. Hostert, M. R. Jepsen, T. Kuemmerle, P. Meyfroidt, E. T. A. Mitchard, J. Reiche, C. M. Ryan und B. Waske (2016). A Review of the Application of Optical and Radar Remote Sensing Data Fusion to Land Use Mapping and Monitoring. In: *Remote Sensing* 8.1.
- Kaden, R. (2014). Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle. Dissertation. Technische Universität München.
- Käfer, W., N. Ritter und H. Schöning (1990). Support for temporal data by complex objects. In: *VLDB*. Bd. 90, S. 24–35.
- Kalyoncu, C. und Ö. Toygar (2015). Geometric leaf classification. In: *Computer Vision and Image Understanding* 133, S. 102–109.
- Kapfer, M. (2007). Ökonomische Auswirkungen ausgewählter Verfahren der Flurneueordnung. Dissertation. Technische Universität München.

- Karmann, H. (2005). Planungsaspekte bei der Anlage ländlicher Straßen und Wege. In: *Landwirtschaftliche Wege*. KTBL.
- Kirmikil, M. und I. Arici (2013). The use of landscape metrics to assess parcel conditions pre- and post-land consolidation. In: *Journal of Food Agriculture & Environment* 11.2, S. 985–989.
- Kolbe, T. H. (2009). Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: *3D Geo-Information Sciences*. Hrsg. von J. Lee und S. Zlatanova. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer Berlin Heidelberg, S. 15–31.
- (2018). Digitale semantische Modelle der Kulturlandschaft zur fachübergreifenden Informationsintegration. In: *27. Hülsenberger Gespräche 2018*. Hrsg. von H. Wilhelm Schaumann Stiftung. Schriftenreihe der H. Wilhelm Schaumann Stiftung. Hamburg, S. 104–113.
- Kollmann, J. (2019). Agrarlandschaften: Ausgeräumt und jetzt wieder eingeräumt? In: *10. Agrarwissenschaftliches Symposium des HEF: Biodiversität in der Agrarlandschaft: Messen - Fördern - Gestalten*, S. 35–38.
- Kröhl, M. (2012). Anforderungen des Flottenmanagements für Lohnunternehmen und überbetrieblichen Maschineneinsatz in der Landwirtschaft. In: *Wege in die Zukunft!? - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 89–101.
- Krüger, A. und T. H. Kolbe (2012). Building Analysis for Urban Energy Planning using Key Indicators on virtual 3D City Models - The Energy Atlas of Berlin. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B2*, S. 145–150.
- KTBL (o.D.). Feldarbeitsrechner. URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html>.
- (2009). Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Aufl. Darmstadt: KTBL.
- (2013). Logistik rund um die Biogasanlage. KTBL-Schrift 498. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Kurnianggoro, L., Wahyono und K.-H. Jo (2018). A survey of 2D shape representation: Methods, evaluations, and future research directions. In: *Neurocomputing* 300, S. 1–16.
- Kutzner, T., K. Chaturvedi und T. H. Kolbe (2020). CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. In: *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, S. 19.
- Kutzner, T. und T. H. Kolbe (2016). Extending Semantic 3D City Models by Supply and Disposal Networks for Analysing the Urban Supply Situation. In: *Lösungen für eine Welt im Wandel, Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG, 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. Hrsg. von T. P. Kersten. Bd. 25. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Bern: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., S. 382–394.
- Lang, S. und T. Blaschke (2007). Landschaftsanalyse mit GIS. UTB ; 8347 : Geowissenschaften, Biologie, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften. Stuttgart: Ulmer.
- Langran, G. und N. R. Chrisman (1988). A Framework For Temporal Geographic Information. In: *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 25.3, S. 1–14.
- LDBV (2012). Datenbeschreibung für die „Tatsächliche Nutzung“ im Format Shape. URL: https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/4699/Kundeninfo%20TN_Shape-Format.pdf.
- (2016). Informationen zur Abgabe aus der DFK abgeleiteter Shape-Daten. URL: https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/5135/DFK_Kundeninformation_shape.pdf.
- (2017). Datenformatbeschreibung Hauskoordinaten. URL: https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/7072/HK_Datenformatbeschreibung.pdf.
- (2018). ALKIS-Objektartenkatalog Bayern ALKIS-Objektartenkatalog Bayern. URL: https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/2604/ALKIS-OK_BY.pdf.

- Lee, D. R. und G. T. Sallee (1970). A Method of Measuring Shape. In: *Geographical Review* 60.4, S. 555–563.
- Lehmigk-Emden, J. (2012). Landesweiter Entwurf eines zukunftsorientierten Verbindungswegenetzes. In: *Wege in die Zukunft!? - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 151–155.
- LfL, Hrsg. (2008). Was kosten Substrate frei Fermenter? URL: http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_32444.pdf.
- Liste, H. J. (1992). Schlaggruppen statt Riesenschläge. In: *Neue Landwirtschaft* 1, S. 35–37.
- Lobo, J., Y.-S. See Eugene, M. Biggs und A. Pandit (2015). An insight into morphometric descriptors of cell shape that pertain to regenerative medicine. In: *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 10.7, S. 539–553.
- Lohfink, A., T. Carnduff, N. Thomas und M. Ware (2007). An Object-oriented Approach to the Representation of Spatiotemporal Geographic Features. In: *Proceedings of the 15th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*. GIS '07. Seattle, Washington: ACM, 35:1–35:8.
- Lohfink, A., D. McPhee und M. Ware (2010). A UML-based Representation of Spatio-Temporal Evolution in Road Network Data. In: *Transactions in GIS* 14.6, S. 853–872.
- MacEachren, A. M. (1985). Compactness of Geographic Shape: Comparison and Evaluation of Measures. In: *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography* 67.1, S. 53–67.
- Machl, T. (2012). Indikatorbasierte Analyse von Feldstücksform und Feldstücksgeometrie auf Grundlage von InVeKoS-Daten. Masterarbeit. Technische Universität München, Fachgebiet Geoinformationssysteme.
- (2013). Flächendeckende Analyse arbeitswissenschaftlich relevanter Aspekte der Feldstücksgeometrie. In: *Geoinformationssysteme 2013*. Hrsg. von A. Koch, R. Bill und A. Donaubaue. Wichmann Verlag, S. 82–91.
- Machl, T., A. Donaubaue, H. Auernhammer und T. H. Kolbe (2013). Shape and Ergonomics: Methods for Analyzing Shape and Geometric Parameters of Agricultural Parcels. In: *EFITA-WCCA- CIGR Conference Sustainable Agriculture through ICT Innovation*. EFITA, WCCA, CIGR.
- Machl, T., A. Donaubaue und T. H. Kolbe (2015a). LandModell = CityGML für die Agrarlandschaft? In: *Geoinformationssysteme 2015 – Beiträge zur 2. Münchner GI-Runde*. Hrsg. von T. H. Kolbe, R. Bill und A. Donaubaue. Heidelberg: Wichmann, S. 120–131.
- (2015b). LandModell: Ein semantisches 3D + t Datenmodell als Integrationsplattform zur Analyse der Agrarlandschaft und ihrer raum-zeitlichen Veränderungsprozesse. In: *Referate der 35. GIL Jahrestagung - Komplexität versus Bedienbarkeit Mensch-Maschine Schnittstellen*. Hrsg. von A. Ruckelshausen, H.-P. Schwarz und B. Theuvsen. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. Geisenheim, S. 101–104.
- (2019a). Planning Agricultural Core Road Networks based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape. In: *Journal of Digital Landscape Architecture* 4, S. 316–327.
- Machl, T., J. Eisentraut, W. Ewald und T. H. Kolbe (2019b). Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen – vom landesweiten Monitoring zur Planungsunterstützung im ländlichen Wegebau. In: *Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft* 16.
- Machl, T. und W. Ewald (2018). Neue Wege für die Zukunft? Erfahrungen aus dem Einsatz neuer Planungsgrundlagen für die Konzeption ländlicher Kernwegesysteme. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)* e.V. Hrsg. von T. P. Kersten, E. Gülch, J. Schiewe, T. H. Kolbe und U. Stilla. Bd. 27. DGPF e.V, Runder Tisch GIS e.V. und DGfK e.V. München, S. 857–861.

- Machl, T., W. Ewald, A. Donaubaueer und T. H. Kolbe (2016). Entwicklung eines Werkzeugs zur landesweit flächendeckenden Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen in Bayern. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 141.3, S. 197–205.
- (2018). Neue Wege zum landwirtschaftlichen Kernwegenetz? - Erfahrungen aus dem Einsatz neuartiger Planungsgrundlagen im Modellprojekt 'Kernwegekonzept NES-Allianz. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 143.2, S. 76–83.
- Martin, R. R. und P. L. Rosin (2004). Turning shape decision problems into measures. In: *International Journal of Shape Modeling* 10.1, S. 83–113.
- Mauersberger, V. (1994). Neue Schlaggestaltung - Erfordernisse und Möglichkeiten. In: *Neue Landwirtschaft* 8.
- Mederle, M., A. Urban, H. Fischer, U. Hufnagel und H. Bernhardt (2015). Optimierungspotenzial eines Standardtraktors im Straßentransport. In: *Landtechnik – Agricultural Engineering* 70.5, S. 194–202.
- Meinel, G., R. Hecht, H. Herold und G. Schiller (2008). Automatische Ableitung von stadtstrukturellen Grundlagendaten und Integration in einem Geographischen Informationssystem. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/forschungen/2008/Heft134_DL.pdf; jsessionid = 41C2D75073FC1F4786E42E470AF86B1E.live11294?__blob=publicationFile&v=1.
- Meißner, H.-D. (2012). Welche Ausbaustandards werden ländliche Wege der Zukunft haben? In: *Wege in die Zukunft!?* - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 119–131.
- Meißner, J. (1996). Passende Rechtecke sind günstig. In: *Neue Landwirtschaft* 9, S. 84–87.
- Michel, E. und U. Walz (2012). Landschaftsstruktur und Artenvielfalt art- und lebensraum-spezifische Untersuchungen am Fallbeispiel der Bodenbrüter. In: *Angewandte Geoinformatik 2012*. Hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke und G. Griesebner. Berlin/Offenbach: Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH.
- Moninger, S. (2014). Viele Wege führen letztlich zum Ziel. In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* 34, S. 27.
- Montero, R. und E. Bribiesca (2009). State of the art of compactness and circularity measures. In: *International Mathematical Forum*. Bd. 4, S. 1305–1335.
- Morel, M. und G. Gesquière (2014). Managing Temporal Change of Cities with CityGML. In: *Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*. Hrsg. von G. Besuievsky und V. Turre. The Eurographics Association.
- Moshrefzadeh, M., K. Chaturvedi, I. Hijazi, A. Donaubaueer und T. H. Kolbe (2017). Integrating and Managing the Information for Smart Sustainable Districts - The Smart District Data Infrastructure (SDDI). In: *Geoinformationssysteme 2017 – Beiträge zur 4. Münchner GI-Runde*. Hrsg. von T. H. Kolbe, R. Bill und A. Donaubaueer. Wichmann Verlag, S. 57–75.
- Moshrefzadeh, M., T. Machl, D. Gackstetter, A. Donaubaueer und T. H. Kolbe (2020). Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape. In: *Journal of Digital Landscape Architecture* 5, S. 173–186.
- O'Rourke, J., A. Aggarwal, S. Maddila und M. Baldwin (1986). An optimal algorithm for finding minimal enclosing triangles. In: *Journal of Algorithms* 7.2, S. 258–269.
- Object Management Group (2017). OMG[®] Unified Modeling Language[®] (OMG UML[®]). URL: <https://www.omg.org/spec/UML/>.
- OGC (2011). OpenGIS[®] Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture. Standard. URL: portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=25355.
- Oksanen, T. (2007). Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. Dissertation. Helsinki University of Technology.

- Peuquet, D. J. (1994). It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. In: *Annals of the Association of American Geographers* 84.3, S. 441–461.
- (2001). Making Space for Time: Issues in Space-Time Data Representation. In: *GeoInformatica* 5.1, S. 11–32.
- (2005). Time in GIS and geographical databases. In: *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. Hrsg. von P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire und D. Rhind. 2nd. Hoboken, N.J.: John Wiley und Sons.
- Peura, M. und J. Iivarinen (1997). Efficiency of Simple Shape Descriptors. In: *In Aspects of Visual Form*. World Scientific, S. 443–451.
- Pfeiffer, M., C. Carré, V. Delfosse, P. Hallot und R. Billen (2013). Virtual Leodium: From an historical 3d city scale model to an archaeological information system. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. II-5/W1, S. 241–246.
- Plexida, S. G., A. I. Sfougaris, I. P. Ispikoudis und V. P. Papanastasis (2014). Selecting landscape metrics as indicators of spatial heterogeneity—A comparison among Greek landscapes. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26.0, S. 26–35.
- PostgreSQL Global Development Group (o.D.). What is PostgreSQL? URL: <https://www.postgresql.org/docs/9.6/features.html>.
- Reckleben, Y., N. Schäfer und M. Weißbach (2013). Steigerung der Effizienz bei Straßen-transporten mit unterschiedlichen Reifentypen für Traktoren. In: *Landtechnik* 68.3, S. 196–201.
- Renetzeder, C., S. Schindler, J. Peterseil, M. A. Prinz, S. Mücher und T. Wrbka (2010). Can we measure ecological sustainability? Landscape pattern as an indicator for naturalness and land use intensity at regional, national and European level. In: *Ecological Indicators* 10.1, S. 39–48.
- Renolen, A. (1999). Concepts and Methods for Modelling Temporal and Spatiotemporal Information. Diss. Norwegian University of Science and Technology.
- (2000). Modelling the Real World: Conceptual Modelling in Spatiotemporal Information System Design. In: *Transactions in GIS* 4.1, S. 23–42.
- Ringler, A. und K. Frobel (2013). Achtung Heimat! In: Hrsg. von Bund Naturschutz in Bayern e.V. München: Volk Verlag. Kap. Verlorene Landschaften, S. 164–185.
- Röder, N., A. Ackermann, S. Baum und S. Rudolph (2018). Status quo und aktuelle Entwicklungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung in Deutschland. In: *Natur und Landschaft* 93.6, S. 250–257.
- Rosin, P. L. (1999). Measuring rectangularity. In: *Machine Vision and Applications* 11.4, S. 191–196.
- (2000). Measuring shape: Ellipticity, rectangularity, and triangularity. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition - Computer Vision and Image Analysis*. Hrsg. von A. Sanfeliu, J. J. Villanueva, M. Vanrell, R. Alquezar, J. O. Eklundh und Y. Aloimonos. International Conference on Pattern Recognition, S. 952–955.
- (2003). Measuring shape: ellipticity, rectangularity, and triangularity. In: *Machine Vision and Applications* 14.3, S. 172–184.
- (2008). A two-component rectilinearity measure. In: *Computer Vision and Image Understanding* 109.2, S. 176–185.
- (2009). Classification of pathological shapes using convexity measures. In: *Pattern Recognition Letters* 30.5, S. 570–578.
- Rosin, P. L. und J. Žunić (2008). 2D Shape Measures for Computer Vision. In: *Handbook of applied algorithms - solving scientific, engineering and practical problems*. Hrsg. von A. Nayak und I. Stojmenovic. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience. Kap. 12.

- Ruhdorfer, R. (2017). Kopplung von Verkehrssimulation und semantischen 3D-Stadtmodellen in CityGML. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- Saad, M., A. Sadoudi, E. Rondet und B. Cuq (2011). Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles? In: *Journal of Food Engineering* 102.4, S. 293–301.
- Sagris, V. (2009). Conformance test for the LPIS Core Model. URL: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/content/download/1682/9148/file/9916.pdf>.
- (2013). Land Parcel Identification System conceptual model: development of geoinfo community conceptual model. Dissertation. Universität von Tartu.
- Sagris, V. und W. Devos (2008). LPIS Core Conceptual Model: Methodology for Feature Catalogue and Application Schema (GeoCAP Discussion paper). Hrsg. von Joint Research Centre. URL: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC49818/reqno_jrc49818_7665_pubsy.pdf.
- (2009). LPIS Core Conceptual Model (GeoCAP Technical Specification). Hrsg. von Joint Research Centre. URL: <http://ies-webarchive-ext.jrc.it/mars/mars/content/download/1676/9118/file/10272pubsy.pdf>.
- Sagris, V., P. Wojda, P. Milenov und W. Devos (2013). The harmonised data model for assessing Land Parcel Identification Systems compliance with requirements of direct aid and agri-environmental schemes of the CAP. In: *Journal of Environmental Management* 118, S. 40–48.
- Schirmer, P. M. und K. W. Axhausen (2016). A multiscale classification of urban morphology. In: *Journal of Transport and Land Use* 9.1, S. 101–130.
- Schnurrbusch, G. (1991). Schlaggestaltung und Schlaggröße aus landeskultureller Sicht. In: *Feldwirtschaft* 5, S. 206–208.
- Schulte, C. und V. Coors (2008). Development of a CityGML ADE for dynamic 3D flood information. In: *Proceedings of the Joint Conference on Information Systems for Crisis Management*.
- Schulze Steinmann, M. und K. Holm-Müller (2010). Thünensche Ringe der Biogaserzeugung – der Einfluss der Transportwürdigkeit nachwachsender Rohstoffe auf die Rohstoffwahl von Biogasanlagen. In: *German Journal of Agricultural Economics* 59.1.
- Siebrecht, N. (2010). Indikatoren gestützte Analyse der Erosionsgefährdung und des Biodiversitätspotenzials als Grundlage des Nachhaltigkeitsmanagements landwirtschaftlicher Betriebssysteme. 1. Aufl. Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme. Berlin: Köster Verlag.
- Sindram, M., T. Machl, H. Steuer, M. Pültz und T. H. Kolbe (2016). Voluminator 2.0 - Speeding up the Approximation of the Volume of Defective 3D Building Models. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. III-2.
- Snodgrass, R. und I. Ahn (1985). A Taxonomy of Time Databases. In: *Proceedings of the 1985 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. SIGMOD '85. Austin, Texas, USA: ACM, S. 236–246.
- Soboth, A. (2012). Notwendigkeiten und Möglichkeiten von Kooperationen gemeindeübergreifender Wegenetze. In: *Wege in die Zukunft!? - Neue Anforderungen an ländliche Infrastrukturen*. Schriftenreihe der Deutschen Landeskulturgesellschaft 9. Deutsche Landeskulturgesellschaft, S. 39–44.
- Stadler, A. und T. H. Kolbe (2007). Spatio-semantic Coherence in the Integration of 3D CityModels. In: *5th International Symposium Spatial Data Quality 2007*. Hrsg. von A. Stein. Bd. XXXVI-2/C43.
- Statistisches Bundesamt (2018). Statistisches Jahrbuch - Deutschland und Internationales. Statistisches Bundesamt.

- Steiner, A. und M. C. Norrie (1997). Implementing temporal databases in object-oriented systems. In: *Database Systems For Advanced Applications' 97*. World Scientific, S. 381–390.
- Steinitz, C. (2012). A framework for Geodesign: Changing Geography by Design. 1. Aufl. Redlands: Esri Press.
- Steinmann, H.-H. und E. S. Dobers (2013). Spatio-temporal analysis of crop rotations and crop sequence patterns in Northern Germany: potential implications on plant health and crop protection. In: *Journal of Plant Diseases and Protection* 120.2, S. 85–94.
- Stell, J. G. (2013). Granular Description of Qualitative Change. In: *Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*. IJCAI '13. Beijing, China: AAAI Press, S. 1111–1117.
- Steuer, H., T. Machl, M. Sindram, L. Liebel und T. H. Kolbe (2015). Voluminator - Approximating the Volume of 3D Buildings to Overcome Topological Errors. In: *AGILE 2015 - Geographic Information Science as an Enabler of Smarter Cities and Communities*. Hrsg. von F. Baçãõ, M. Y. Santos und M. Painho. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Lisbon, Portugal: Springer, S. 343–362.
- Strobl, M. (2013). Merkblatt: Biomasse-Ernte-Logistik Begriff und Faustformel für den Praxiseinsatz. In: *Biogas Forum Bayern Nr. II – 22/2013*. Hrsg. von ALB Bayern e.V.
- Stürmer, B. und M. Eder (2010). Modell zur Optimierung der Substratbereitstellungskosten bei Biogasanlagen. In: *Die Bodenkultur* 61.1, S. 39–49.
- Süß, H. (2014). Größer und effizienter. In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* 34, S. 29–30.
- Teague, M. R. (1980). Image analysis via the general theory of moments. In: *J. Opt. Soc. Am.* 70.8, S. 920–930.
- Thibaud, R., G. Del Mondo, T. Garlan, A. Mascaret und C. Carpentier (2013). A Spatio-Temporal Graph Model for Marine Dune Dynamics Analysis and Representation. In: *Transactions in GIS* 17.5, S. 742–762.
- Thiemann, K.-H. (2017). Die Anwendung von § 86 FlurbG im Kontext einer nachhaltigen Kulturlandschaftsentwicklung. In: *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 142.5, S. 301–308.
- Umweltbundesamt (2019). Flächensparen – Böden und Landschaften erhalten. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten#textpart-1>.
- Uppenkamp, N. (o. J.). Deseleinsparung in der Pflanzenproduktion. Hrsg. von DLG e.V. Testzentrum Technik und Betriebsmittel Ausschuss für Technik in der Pflanzlichen Produktion. URL: https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_339.pdf.
- Wagner, A. und H. Seufert (2000). Transporteile und -kosten der Grünlandbewirtschaftung in Mittelgebirgslagen. In: *Landtechnik – Agricultural Engineering* 55.5, S. 342–343.
- Walz, U. (2015). Indicators to monitor the structural diversity of landscapes. In: *Ecological Modelling* 295, S. 88–106.
- Wang, B. (2011). Shape retrieval using combined Fourier features. In: *Optics Communications* 284.14, S. 3504–3508.
- Wentz, E. A. (1997). Shape analysis in GIS. In: *Proceedings of Auto-Carto*. Bd. 13, S. 7–10.
- Wilcox, D. J., M. C. Harwell und R. J. Orth (2000). Modeling Dynamic Polygon Objects in Space and Time: A New Graph-based Technique. In: *Cartography and Geographic Information Science* 27.2, S. 153–164.
- Willenborg, B. (2015). Simulation of Explosions in Urban Space and Result Analysis Based on CityGML City Models and a Cloud Based 3D Web Client. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik.

- Worboys, M. (1994). A Unified Model for Spatial and Temporal Information. In: *The Computer Journal* 37.1, S. 26–34.
- Worboys, M. und M. Duckham (2004). *GIS : A Computing Perspective*. 2nd. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Xu, D. und H. Li (2008). Geometric moment invariants. In: *Pattern Recognition* 41.1, S. 240–249.
- Yang, M., K. Kpalma und J. Ronsin (2008). A Survey of Shape Feature Extraction Techniques. In: *Pattern Recognition*. Hrsg. von P.-Y. Yin. IN-TECH, S. 43–90.
- Yuan, M. (1999). Use of a Three-Domain Representation to Enhance GIS Support for Complex Spatiotemporal Queries. In: *Transactions in GIS* 3.2, S. 137–159.
- Zahn, C. T. und R. Z. Roskies (1972). Fourier Descriptors for Plane Closed Curves. In: *Computers, IEEE Transactions on C-21.3*, S. 269–281.
- Zakaria, M. F., H. S. Choon und S. A. Suandi (2012). Object shape recognition in image for machine vision application. In: *International Journal of Computer Theory and Engineering* 4.1, S. 76.
- Zenger, X. (2011). *Agrarstrukturentwicklung in Bayern*. Hrsg. von Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- Zenger, X. und R. Friebe (2015). *Agrarstrukturentwicklung in Bayern – IBA-Agrarstrukturbericht 2014*. Hrsg. von Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). URL: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/agrarstrukturentwicklung-bayern_lfl-information.pdf.
- Zhang, D. und G. Lu (2004). Review of shape representation and description techniques. In: *Pattern Recognition* 37.1, S. 1–19.
- Zimmermann, A. (2011). *Basismodelle der Geoinformatik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 303.
- Žunić, D., C. Martinez-Ortiz und J. Žunić (2012). Shape Rectangularity Measures. In: *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 26.6.
- Žunić, J. und P. L. Rosin (2004). A new convexity measure for polygons. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26.7, S. 923–934.