

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Wissenschaftszentrum Weihenstephan für
Ernährung, Landnutzung und Umwelt

**Der Wasserfluss in Einzelpflanze und Bestand:
Modellierung und Messung**

Florian Andreas Heinlein

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Jörg Durner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Eckart Priesack
2. Prof. Dr. Urs Schmidhalter

Die Dissertation wurde am 29.03.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 08.08.2017 angenommen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation begleitet haben. Insbesondere danke ich Prof. Dr. Eckart Priesack. Als Betreuer und Doktorvater unterstützte er mich durch seine fachliche Kompetenz und gab mir stets hilfreiche Ratschläge. Dennoch ließ er mir auch viele Freiheiten bei der Verwirklichung eigener Ideen.

Weiterer Dank gilt meinen Kollegen am Helmholtz Zentrum München. Christian Klein war immer hilfsbereit, besonders wenn es um das Lösen schwieriger Programmieraufgaben oder um Fragen zu Expert-N 5.0 ging. Er ist mir auch während der Promotionszeit ein guter Freund geworden. Dr. Christian Biernath half durch seine fachliche Kompetenz im Bereich der Boden- und Pflanzenkunde. Auch hatte er immer ein offenes Ohr für Probleme und schaffte es, mich aufzubauen, wenn Manches nicht wie erhofft lief. Mein Dank gilt ebenfalls Dr. Rainer Hentschel, der mir bei der Aneignung des Xylemflussmodells behilflich war und mich ins Terrestrische Laserscannen einwies. Christoph Thieme und mich verband die Zugehörigkeit zur Research School MICMoR, wodurch wir ein sehr gutes Verhältnis aufbauen konnten. Außerdem danke ich ihm und Rolf Schilling für Messdaten aus Scheyern, die für diese Dissertation hilfreich waren. Xiaohong Duan hielt mir durch die Realisierung der Expert-N 5.0-MP-MAS-Kopplung den Rücken für andere Aufgaben frei. Marius Bickel, meinem Werkstudenten, danke ich für die Unterstützung bei der Auswertung diverser Messdaten.

Ebenso danke ich der Helmholtz Research School MICMoR, die mich bei meiner wissenschaftlichen und persönlichen Weiterentwicklung unterstützte. Insbesondere möchte ich hier den Initiator, Prof. Dr. Hans Peter Schmid, und die Koordinatorinnen, Dr. Bärbel Elija Bleher, Petra Guppenberger und Karen Suppan, erwähnen. Mein Dank gilt ebenfalls den Mitgliedern meines Thesis Advisory Komitees, Prof. Dr. George Craig und Prof. Dr. Urs Schmidhalter, die mir durch ihre fachliche Kompetenz guten Input gaben. Bei Heinz Lösslein vom Meteorologischen Institut München bedanke ich mich für die Wetterdaten des meteorologischen Messturms in Garching, die als Input für Simulationen in dieser Arbeit gedient haben. Für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes danke ich der DFG-Forschergruppe 1695 “Regionaler Klimawandel”.

Nicht nur für das sprachliche Korrekturlesen dieser Dissertation möchte ich Florian Schütz danken: er ist mir auch seit mehr als 7 Jahren ein verlässlicher Partner und Freund im Leben.

Zu guter Letzt danke ich all meinen Freunden und Verwandten dafür, dass sie mein Leben bereichern. Vor allem möchte ich hier meine Eltern, Heidi und Hans Heinlein, meine Schwester, Daniela Heinlein, sowie meine verstorbene Oma, Anna Heinlein, erwähnen, die mir in allen erdenklichen Lebenslagen mit Rat und Tat – und falls nötig finanziell – zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Verzeichnis der Abkürzungen und mathematischen Zeichen	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen des Klimawandels	1
1.2 Veränderte Wasserverfügbarkeit	2
1.3 Landoberflächenmodelle	4
1.4 Wasserfluss in Einzelpflanzenmodellen	6
1.5 Skalierung	7
2 Material und Messmethoden	11
2.1 Lysimeteranlage Neuherberg	11
2.1.1 Allgemeines	11
2.1.2 Versuchsaufbau	13
2.2 Forschungsplattform Scheyern	16
2.2.1 Allgemeines	16
2.2.2 Feldmessungen, Bewirtschaftung, Böden und Klima	17
2.3 Wasserbilanzmessungen durch Lysimeter	19
2.4 Saftflussmessung: Die Heat-Ratio-Methode	20
2.5 Terrestrische Laserscans	22
2.6 Messungen der Veränderung der Stängeldurchmesser bei Mais	24
2.7 Eddy-Kovarianz: Messung des latenten Wärmeflusses	25
2.8 Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung	27
2.9 Wurzelverteilung	28

3	Ergebnisse und Diskussion der Messungen	29
3.1	Wasserbilanz	29
3.2	Bodenfeuchtemessungen	34
3.3	Saftflussmessung	38
3.4	Terrestrische Laserscans	46
3.5	Messungen von Stängeldurchmessern bei Mais	50
3.6	Eddy-Kovarianz: Messung des latenten Wärmeflusses	52
3.7	Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung	55
3.8	Wurzelverteilung	60
4	Simulationen: Methoden und Modellbeschreibung	63
4.1	Das Modellsystem Expert-N	63
4.2	Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz	69
4.2.1	Allgemeine Modellkonfiguration	70
4.2.2	Potentielle Evapotranspirationsmodule	75
4.2.2.1	Penman-Monteith ASCE	75
4.2.2.2	Penman-Monteith FAO	75
4.2.2.3	Haude	76
4.2.2.4	k_c -Faktoren und Kompabilität mit dem Modellsystem	76
4.2.3	Pflanzenmodule	77
4.2.3.1	SPASS	77
4.2.3.2	CERES	78
4.3	Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes	81
4.3.1	Die Expert-N Modellkonfiguration	81
4.3.2	Das Xylemflussmodell	83
4.3.2.1	Beschreibung der Pflanzenarchitektur	83
4.3.2.2	Beschreibung des Wasserflusses in der Pflanze	85
4.3.2.3	Bodenwasseraufnahme und Transpiration	88
4.3.2.4	Anpassung des Xylemflussmodells an Mais	89
4.4	Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen	91
4.4.1	Konfiguration von Expert-N 5.0 und Simulationsmethode	91
4.4.2	Generierung der verschiedenen Modellgitter	94
4.4.2.1	Das Wetter in Nordrhein-Westfalen	96
4.4.2.2	Die Böden in Nordrhein-Westfalen	103
4.5	Statistische Maße zum Vergleich von Modell und Messung	106

5 Simulationen: Ergebnisse, Vergleich mit Messungen und Diskussion	107
5.1 Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz	107
5.1.1 Saftfluss und Transpiration	107
5.1.2 Blattflächenindex (LAI)	113
5.1.3 Bodenwassergehalte	115
5.1.4 Wasserbilanz	119
5.2 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes	125
5.2.1 Bodenwassergehalte	125
5.2.2 Architekturen und Wasserpotential der Pflanzen	128
5.2.3 Saftfluss und Transpiration	131
5.2.4 Stängeldurchmesser	142
5.2.5 Latenter Wärmefluss	143
5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen	148
5.3.1 Zeitreihen	148
5.3.2 Flächige Darstellung	154
5.3.3 Auswirkungen der verschiedenen räumlichen Auflösungen auf die Simulationsergebnisse	165
6 Generelle Diskussion und Schlussfolgerungen	171
6.1 Saftflussmessung mit der Heat-Ratio-Methode	171
6.2 Anwendbarkeit des Xylemflussmodells	173
6.3 Bedarfsgerechte Bewässerung	175
6.4 Expert-N 5.0 als Landoberflächenmodell	177
7 Zusammenfassung	179
Literaturverzeichnis	181

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

2.1	Überblick über die Lysimeteranlage in Neuherberg	12
2.2	Querschnitt eines Lysimeters inklusive Instrumentierung (aus Reth u. a. 2007)	13
2.3	Entwicklung der Maispflanzen auf Lysimeter 43 in Neuherberg von 30. Mai bis 6. September 2012	14
2.4	Installierte Saftflusssensoren, Dendrometer sowie Abdeckung des Bodens eines Lysimeters in Neuherberg	14
2.5	Zwei mit Mais bepflanzte Lysimeter in Neuherberg	15
2.6	Luftbild des Prielhofs in Scheyern mit umgebenden Feldern	17
2.7	Überblick über die einzelnen Schläge und die wissenschaftliche Nutzung des Versuchsguts Scheyern	18
2.8	Installiertes Dendrometer an einer Pflanze auf einem Lysimeter in Neuherberg am 26. September 2014	24
2.9	Eddy-Kovarianz-Station der Forschungsplattform Scheyern am 27. Oktober 2015	26
2.10	Aufgeklebte Maisblätter, Pflanzenernte am 2. Oktober 2015 in Scheyern	28
3.1	Zeitreihe der gemessenen Wetterdaten von 14. August bis 11. September 2013 aus Garching (Nähe Lysimeterstation Neuherberg)	30
3.2	Zeitreihe der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter von 14. August bis 11. September 2013	31
3.3	Zeitreihe des Niederschlags von 14. August bis 11. September 2013, ermittelt aus der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter	31
3.4	Zeitreihe der Evapotranspiration von 14. August bis 11. September 2013, ermittelt aus der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter	32
3.5	Stündlich gemessene Bodenwassergehalte in 50 cm und 80 cm Tiefe im Lysimeter 45 der Lysimeteranlage Neuherberg im Jahr 2013	35
3.6	Bodenwassergehalte im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe von 15. Juli bis 15. September 2015	37
3.7	Stundenmittel der gemessenen Saftflussraten in fünf verschiedenen Pflanzen auf Lysimeter 45 in Neuherberg von 14. August bis 11. September 2013	39
3.8	Zeitreihe der gemessenen Wetterdaten auf der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis einschließlich 1. Oktober 2015	41

3.9	Zeitreihe des Saftflusses in vier verschiedenen Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis einschließlich 1. Oktober 2015	42
3.10	Zweidimensionale Darstellung einer dreidimensionalen Punktwolke von vier eingescannten Maispflanzen auf dem Schlag A15 der Forschungsplattform Scheyern am 6. September 2013	47
3.11	Zweidimensionale Abbildungen der dreidimensionalen Punktwolken von eingescannten Maispflanzen mit Pflanzenarchitekturen	48
3.12	Zeitreihe der Durchmesser von vier verschiedenen Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 22. Juli bis einschließlich 1. Oktober 2015	51
3.13	Streudiagramm (nach Art von Hovmöller) halbstündlicher Mittel des latenten Wärmeflusses, der von 15. Juli bis 3. Oktober 2015 zwischen den Schlägen A17 und A18 der Forschungsplattform Scheyern gemessen wurde	53
3.14	Maximale Blattbreite, Stängeldurchmesser und Blattfläche der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, die im Jahr 2015 mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren, in Abhängigkeit der Höhe	58
3.15	Wurzelbestimmung am 27. Oktober 2015 im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern und gemessene Wurzelverteilung	61
4.1	Hauptfenster der graphischen Benutzeroberfläche von Expert-N 5.0 . . .	64
4.2	Optionsfenster für jedes Expert-N-Projekt	66
4.3	Schematische Darstellung eines Gitters von Expert-N mit neun Gitterpunkten	66
4.4	Auswahlfenster für die Modellkonfiguration einer Expert-N-Instanz . . .	67
4.5	Schematische Darstellung der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration	73
4.6	Ausschnitt der Kantenliste einer tlp-Datei	84
4.7	Lage von Nordrhein-Westfalen innerhalb Deutschlands und Aufteilung von Nordrhein-Westfalen in verschiedene Gitter	95
4.8	Dreißigjährige Mittelwerte der Temperaturdaten von Nordrhein-Westfalen in 1 km × 1 km Auflösung	97
4.9	Dreißigjährige Mittelwerte der Wetterdaten von Nordrhein-Westfalen in 1 km × 1 km Auflösung	98
4.10	Zeitreihe der jährlichen Wetterdaten von Nordrhein-Westfalen zwischen 1982 und 2011	102
4.11	Bodendaten von Nordrhein-Westfalen in 1 km × 1 km Auflösung	104
5.1	Zeitreihe der gemessenen und simulierten Saftflussraten (Lysimeter 45 in Neuherberg) von 14. August bis 11. September 2013	108
5.2	Gemittelte Tagesgänge der gemessenen und simulierten Transpiration (Lysimeter 45 in Neuherberg) im Zeitraum von 14. August bis 11. September 2013	109

5.3	Zeitreihe der simulierten Blattflächenindizes (Lysimeter 45 in Neuherberg) von 16. Mai bis 16. November 2013	114
5.4	Zeitreihe der gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte (Lysimeter 45 in Neuherberg) in 10 cm, 50 cm und 80 cm Tiefe im Jahr 2013	116
5.5	Zeitreihe der gemessenen und simulierten täglichen Wasserbilanz (Lysimeter 45 in Neuherberg) von 16. Mai bis 16. November 2013	120
5.6	Zeitreihen der gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe von 15. Juli bis 15. September 2015	126
5.7	Architekturen von vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern mit simulierten Xylemmatrixpotentialen	130
5.8	Gemessener und modellierter Saftfluss von vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis 1. Oktober 2015	135
5.9	Streudiagramm der täglichen gemessenen und modellierten Transpiration von vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis 1. Oktober 2015	138
5.10	Gemessene und modellierte Schwankung des Stängeldurchmessers von vier Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Zeitraum von 15. Juli bis 1. Oktober 2015	141
5.11	Gemessener und modellierter latenter Wärmefluss aus dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis 1. Oktober 2015	145
5.12	Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen) von 1983 bis 2011, simuliert mit durchschnittlichen Bodendaten und räumlich unterschiedlich aufgelösten Wetterdaten	150
5.13	Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen) von 1983 bis 2011, simuliert mit räumlich unterschiedlich aufgelösten Boden- und Wetterdaten	152
5.14	Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten Perkolation (Nordrhein-Westfalen) von 1983 bis 2011, simuliert mit räumlich unterschiedlich aufgelösten Boden- und Wetterdaten	153
5.15	Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen), simuliert in 1 km × 1 km Auflösung	155
5.16	Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen) in vier verschiedenen räumlichen Auflösungen, simuliert mit gleichem Wetter und unterschiedlichen Bodendaten auf jedem Gitterpunkt	158
5.17	Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen) in vier verschiedenen räumlichen Auflösungen, simuliert mit unterschiedlichen Boden- und Wetterdaten auf jedem Gitterpunkt	159
5.18	Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolation (Nordrhein-Westfalen), simuliert in 1 km × 1 km Auflösung	161

Abbildungsverzeichnis

5.19 Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolation (Nordrhein-Westfalen) in vier verschiedenen räumlichen Auflösungen, simuliert mit gleichem Wetter und unterschiedlichen Bodendaten auf jedem Gitterpunkt	162
5.20 Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolation (Nordrhein-Westfalen) in vier verschiedenen räumlichen Auflösungen, simuliert mit unterschiedlichen Wetter- und Bodendaten auf jedem Gitterpunkt	163
5.21 Box-Whisker-Plots der über 30 Jahre gemittelten, jährlichen Evapotranspiration (Nordrhein-Westfalen), simuliert in verschiedenen räumlichen Auflösungen	166
5.22 Box-Whisker-Plots der über 30 Jahre gemittelten, jährlichen Perkolation (Nordrhein-Westfalen), simuliert in verschiedenen räumlichen Auflösungen	168

Tabellenverzeichnis

2.1	Bodeneigenschaften und hydraulische Charakteristika der für diese Dissertation verwendeten Lysimeter in Neuherberg (modifizierte Tabelle aus Klier 2007)	15
2.2	Bodeneigenschaften des Schlags A17 der Forschungsplattform Scheyern	19
3.1	Minimum und Maximum der Dreistundenmittel der gemessenen Bodenwassergehalte auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Zeitraum zwischen 15. Juli und 15. September 2015	36
3.2	Trockenmassen, Höhen und maximaler/minimaler Stängeldurchmesser (auf Höhe der Saftflussmessung) von zehn Maispflanzen auf den zwei Lysimetern in Neuherberg im Jahr 2014	56
3.3	Frisch- und Trockenmassen von sieben zufällig und zu unterschiedlichen Zeitpunkten geernteten Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Jahr 2015	56
3.4	Trockenmassen der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, die mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren	57
3.5	Maximaler und minimaler Stängeldurchmesser der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern auf Höhe der Saftflusssensoren sowie der Dendrometer	59
4.1	Expert-N Modellkonfiguration zur Simulation der Wasserbilanz (Lysimeter 45 in Neuherberg) im Jahr 2013	71
4.2	Bodenhydraulische Parameter für die Simulationen der Wasserbilanz (Lysimeter 45 in Neuherberg) im Jahr 2013	72
4.3	Entwicklungs-Stadien des CERES-Modells, aufgeschlüsselt nach den drei Pflanzenarten Mais, Gerste und Weizen (modifiziert aus Priesack 2006)	79
4.4	Expert-N Modellkonfiguration zur Simulation des Wasserflusses in vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Jahr 2015	82
4.5	Bodenhydraulische Parameter des Schlags A17 der Forschungsplattform Scheyern (FAM-Datenbank)	83
4.6	Originale und an Mais angepasste Pflanzenparameter für das Xylemflussmodell	90
4.7	Modellkonfiguration von Expert-N für die dreißigjährigen AgMIP- und MACSUR-Simulationen von Nordrhein-Westfalen	92

4.8	Räumliche Auflösungen und maximale Anzahl der zu simulierenden Gitterpunkte für die 30-jährigen AgMIP- und MACSUR-Simulationen von Nordrhein-Westfalen	95
4.9	Durchschnittliche Bodendaten von Nordrhein-Westfalen	105
5.1	Indizes of Agreement und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen zwischen gemessenem und simuliertem Saftfluss (Lysimeter 45 in Neuherberg) im Zeitraum 14. August bis 11. September 2013	110
5.2	Indizes of Agreement und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen zwischen gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten (Lysimeter 45 in Neuherberg) in 50 cm und 80 cm Tiefe im Jahr 2013	117
5.3	Indizes of Agreement und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen zwischen gemessener und simulierter Evapotranspiration, Perkolation, und Änderung des Wassergehaltes in der ganzen Bodensäule (Lysimeter 45 in Neuherberg)	122
5.4	Gemessene und simulierte kumulative Evapotranspiration, Perkolation und Änderung des Wassergehaltes in der ganzen Bodensäule (Lysimeter 45 in Neuherberg) von 16. Mai bis 16. November 2013	122
5.5	Indizes of Agreement und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen zwischen gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten (Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern) im Zeitraum 15. Juli bis 15. September 2015	127
5.6	Indizes of Agreement und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen zwischen gemessenem und simuliertem Saftfluss (Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern) im Zeitraum 15. Juli bis 1. Oktober 2015	136

Verzeichnis der Abkürzungen und mathematischen Zeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	kPa	Campbell-Parameter zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften des Bodens
<i>a</i>	mm	Luft Eintrittswert (Xylemflussmodell)
ADE		Advection Dispersion Equation
AgMIP		The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project
APSIM		Agricultural Production Systems sIMulator
ASCE		American Society of Civil Engineers
B		Campbell-Parameter zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften des Bodens
<i>B</i>	mm	Breite eines Blattes (Xylemflussmodell)
<i>b</i>	mm	Eingabeparameter für die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (Xylemflussmodell)
<i>b_i</i>	mm	Länge eines Blattelementes <i>i</i> (Xylemflussmodell)
BBCH		Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie
<i>c</i>		Eingabeparameter für die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (Xylemflussmodell)
<i>c_{fr}</i>	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	Spezifische Wärmekapazität von frischem Pflanzenmaterial
<i>C_h</i>	J m ⁻³ °C ⁻¹	Volumetrische Wärmekapazität
<i>C_n</i>	s m ⁻¹	Nennerkonstante (Penman-Monteith)
<i>C_{org}</i>	kg dm ⁻³	Gehalt des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden
<i>c_p</i>	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	Spezifische Wärmekapazität von Pflanzenmaterial
<i>c_w</i>	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	Spezifische Wärmekapazität von Wasser
<i>C_z</i>	°C mm s ³ Mg ⁻¹ h ⁻¹	Zählerkonstante (Penman-Monteith)
CERES		Crop Environment REsource Synthesis

Verzeichnis der Abkürzungen und mathematischen Zeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
csv		Comma-separated values
C:N		Verhältnis von Kohlenstoff- zu Stickstoffmenge im Boden
d_{\max}	mm	Maximaler Stängeldurchmesser
d_{\min}	mm	Minimaler Stängeldurchmesser
DayCent		Daily Century
DOY		Day of year (Tag des Jahres)
E	mm	Evaporation
E	mm	Elastischer Modulus (Xylemflussmodell)
e_a	kPa	Aktueller Dampfdruck der Luft
E_{act}	mm	Aktuelle Evapotranspiration
E_{pot}	mm	Potentielle Evaporation
E_q	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Vertikaler Fluss von Wasserdampf
e_s	kPa	Sättigungsdampfdruck der Luft
ET	mm	Evapotranspiration
ET_{act}	mm	Aktuelle Evapotranspiration
ET_{pot}	mm	Potentielle Evapotranspiration
ET_{ref}	mm	Referenz-Evapotranspiration (potentielle)
f_{Haude}		Haude-Faktor
F_v		Leerraumanteil von Pflanzenmaterial (Heat-Ratio-Methode)
FAM		Forschungsverbund Agrarökosysteme München
FAO		Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen)
G	$\text{W m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Bodenwärmefluss an der Bodenoberfläche
GDNRW		Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
GECROS		Genotype-by-Environment interaction on CROp growth Simulator)
GTK+		GNU Image Manipulation Program Toolkit
h	mm	Matrixpotential
IA		Index of Agreement (statistisches Maß)
$j_{r,x}$	$\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$	Eindimensionaler, volumetrischer Fluss für die Wurzelwasseraufnahme
k_c		Faktor zur Korrektur der potentiellen Evapotranspiration
K_{fr}	$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$	Thermische Leitfähigkeit von frischem Pflanzenmaterial
K_h	$\text{J m}^{-1} \text{d}^{-1} \text{°C}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
k_{max}	mm s^{-1}	Maximale hydraulische Leitfähigkeit im Stängel, Blatt oder den Wurzeln (Xylemflussmodell)
$k_{max, stom}$	mm s^{-1}	Maximale stomatäre Leitfähigkeit eines Blattes
K_s	$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$	Thermische Leitfähigkeit von Wasser
k_s	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Wärmeleitzahl (Heat-Ratio-Methode)
K_{sat}	mm d^{-1}	Hydraulische Leitfähigkeit des Bodens bei Sättigung
K_{tr}	$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$	Thermische Leitfähigkeit von getrocknetem Pflanzenmaterial
k_x	mm s^{-1}	Hydraulische Leitfähigkeit des Xylems
$k_{x, stom}$	mm s^{-1}	Aktuelle stomatäre Leitfähigkeit eines Blattes
$K(h)$	mm d^{-1}	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens
$K(\theta_x)$		Relative Leitfähigkeit des volumetrischen Wasserflusses in einem Kapillarbündel
L	mm	Perkolation
L	mm	Länge eines Blattes (Xylemflussmodell)
L_{ev}	J kg^{-1}	Latente Verdunstungswärme
L_{evap}	$\text{MJ m}^{-2} \text{mm}^{-1}$	Spezifische Verdunstungswärme von Wasser
l_i	mm	Länge eines Blattelements (Xylemflussmodell)
l_x	mm	Länge eines Zylinderelements (Xylemflussmodell)
LAI	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	Leaf area index (Blattflächenindex)
LANUV		Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
LE	W m^{-2}	Latenter Wärmefluss
m	cm^{-1}	Van Genuchten Parameter
m_{fr}	kg	Masse von frischem Pflanzenmaterial
m_{Lysi}	kg	Gewicht eines Lysimeters
m_{out}	kg	Gewicht des Sickerbehälters eines Lysimeters
m_{tot}	kg	Gesamtgewicht des Systems Lysimeter plus Sickerbehälter
m_{tr}	kg	Masse von getrocknetem Pflanzenmaterial
ΔM	mm	Massenänderung des Systems Lysimeter plus Sickerbehälter
MACSUR		Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security
MIM		Meteorologisches Institut München
MPI		Message Parsing Interface
MP-MAS		Mathematical Programming-based Multi-Agent-Systems
n	cm^{-1}	Van Genuchten Parameter

Verzeichnis der Abkürzungen und mathematischen Zeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
NetCDF		Network Common Data Format
NRW		Nordrhein-Westfalen
NSE		Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz (statistisches Maß)
NumPy		Numerical Python
\bar{O}		Mittelwert aller Messwerte (bei der Berechnung von statistischen Maßen)
O_i		Messwert zu einem bestimmten Zeitpunkt (bei der Berechnung von statistischen Maßen)
OGS		OpenGeoSys
OpenMP		Open Multi-Processing
P	mm	Niederschlag
P_i		Simulationswert zu einem bestimmten Zeitpunkt (bei der Berechnung von statistischen Maßen)
p_i	mm	Position in der Mitte eines Blattelements (Xylemflussmodell)
q	kg kg ⁻¹	Spezifische Luftfeuchte
\bar{q}	kg kg ⁻¹	Mittlere spezifische Luftfeuchte
q'	kg kg ⁻¹	Abweichung der spezifischen Luftfeuchte von ihrem Mittelwert
$q_{max,lf}$	mm s ⁻¹	Maximale Transpirationsrate eines Blattes
q_w	m d ⁻¹	Volumetrischer Wasserfluss im Boden
R_n	W m ⁻² h ⁻¹	Nettostrahlung an der Oberfläche des Pflanzenbestandes
R_s	W m ⁻²	Solarstrahlung
RH	%	Relative Luftfeuchte
S_w	mm mm ⁻¹ d ⁻¹	Wassersenke im Boden (Wurzelwasseraufnahme)
S_x	s ⁻¹	Quellen- oder Senkenterm der Richards-Gleichung (Xylemflussmodell)
s_x	m ²	Querschnittsfläche des Xylems
s_{xw}	m ²	Mit Wasser gefüllte Querschnittsfläche des Xylems
SCF		Bodenbedeckungsgrad
SPASS		Soil-Plant-Atmosphere System Simulation
SUCROS		Simple and Universal CROp growth Simulator
SWAP		Soil-Water-Atmosphere-Plant
Δ SWC	mm	Änderung des Wassergehaltes (soil water content) in der ganzen Bodensäule
t	s	Zeit
T	mm	Transpiration

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
T_{act}	mm	Aktuelle Transpiration
$T_{act,l,f,x}$	mm s^{-1}	Aktuelle Blatttranspiration
T_{air}	$^{\circ}\text{C}$	Lufttemperatur
T_{pot}	mm	Potentielle Transpiration
$T_{pot,l,f,x}$	mm s^{-1}	Potentielle Blatttranspiration
TDR		Time domain reflectometry
TERENO		TERrestrial ENvironmental Observatories
tlp-Datei		<i>Tulip</i> -Datei
TLS		Terrestrischer Laserscan
U_{in}	mV	Versorgungsspannung der Dendrometer
U_{out}	mV	Gemessene Ausgabespannung der Dendrometer
u_2	m s^{-1}	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe
v	m s^{-1}	Horizontale Windgeschwindigkeit
V_{fr}	m^3	Volumen von frischem Pflanzenmaterial
V_h	cm h^{-1}	Geschwindigkeit des Hitzepulses (Heat-Ratio-Methode)
V_k	cm h^{-1}	Korrigierte Hitzepulsgeschwindigkeit (Heat-Ratio-Methode)
V_s	cm h^{-1}	Saftgeschwindigkeit
V_x	mm^3	Volumen eines Xylemzylinders
VWG	mm	Verfügbare Wassergehalt im Boden
w	m s^{-1}	Vertikale Windgeschwindigkeit
\bar{w}	m s^{-1}	Mittlere vertikale Windgeschwindigkeit
w'	m s^{-1}	Abweichung der vertikalen Windgeschwindigkeit von ihrem Mittelwert
WETTREG		WETTerlagen-basierte REGionalisierungsmethode
WRF		Weather Research and Forecasting
WRF-Chem		Atmospheric Chemistry Observations & Modeling
x	cm	Abstand zwischen Heiznadel und Temperatursensor (Heat-Ratio-Methode)
x_D	μm	Auslenkung der Durchmesser-Dendrometer
z	mm	Tiefe im Boden bzw. Höhe über der Bodenoberfläche
α	cm^{-1}	Van Genuchten Parameter
α_x	$^{\circ}$	Zenitwinkel einer Kante (Xylemflussmodell)
β_i		Koeffizienten ($i = 1, 2, \text{ oder } 3$) zur Berechnung der Verwundungskorrektur (Heat-Ratio-Methode)

Verzeichnis der Abkürzungen und mathematischen Zeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
γ	$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	Psychrometerkonstante
Δ	$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
ϵ	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	Porosität des Xylems
θ	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Volumetrischer Bodenwassergehalt
θ_{fc}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Bodenwassergehalt bei Feldkapazität
θ_{max}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Maximaler gemessener Bodenwassergehalt
θ_{min}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Minimaler gemessener Bodenwassergehalt
θ_{res}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Residualer Bodenwassergehalt
θ_s	kg kg^{-1}	Wassergehalt des Pflanzenmaterials (Heat-Ratio-Methode)
θ_{sat}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Bodenwassergehalt bei Sättigung
θ_{wp}	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Bodenwassergehalt beim permanenten Welkepunkt
θ_x	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Wassergehalt des Xylems
$\theta_{x,a}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Wassergehalt des Xylems bei Lufteintritt
$\Delta\vartheta$	$^\circ\text{C}$	Temperaturänderung der Messnadeln (Heat-Ratio-Methode)
λ		Exponent (Xylemflussmodell)
ρ_{fr}	kg m^{-3}	Dichte von frischem Pflanzenmaterial
ρ_b	kg m^{-3}	Rohdichte des Pflanzenmaterials (Heat-Ratio-Methode)
ρ_l	kg m^{-3}	Dichte von Luft
ρ_w	kg m^{-3}	Dichte von Wasser
ψ_x	mm	Matrixpotential des Xylems
$\psi_{x,lf}$	mm	Aktuelles Matrixpotential eines Blattes
$\psi_{0,lf}$	mm	Minimales Matrixpotential eines Blattes

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Herausforderungen des Klimawandels

Die seit Beginn der Industrialisierung beobachtete Erhöhung der atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen wie z. B. CO_2 führt zu einer Erhöhung der aufgenommenen Solarstrahlung im Erdsystem (Stocker u. a. 2014). Dadurch ändert sich das globale und regionale Klima, z. B. steigen die Temperaturen in der Erdatmosphäre an. Generell kann zwischen menschlichen, also anthropogenen, und natürlichen Ursachen dieser Klimaänderung unterschieden werden (Stocker u. a. 2014). Etwa 44% der Landoberfläche der Erde ist mit Agrarökosystemen wie Grünland und Ackerflächen bedeckt (Latham u. a. 2014). Da diese Agrarökosysteme Treibhausgase wie Wasserdampf, Methan oder Stickoxide emittieren, ist fundiertes Wissen über diese Ökosysteme nötig, um den Klimawandel auf der globalen und der lokalen Skala zu verstehen und vorherzusagen. Während der direkte menschliche Einfluss auf unbewirtschaftete Ökosysteme gering ist, hat Tierhaltung und landwirtschaftliche Bewirtschaftung einen großen Einfluss auf Grünland und Ackerflächen und deren Treibhausgasemissionen (Yin und van Laar 2005).

Umgekehrt wird der Klimawandel durch die Erhöhung der Temperaturen und der atmosphärischen CO_2 -Konzentration einen Einfluss auf das zukünftige Wachstum sowie den zukünftigen Ertrag von Agrarpflanzen haben. Rosenzweig und Parry (1994) fanden heraus, dass eine Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration global betrachtet kaum Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben wird, während die regionalen Erträge von Ackerpflanzen sich stark verändern werden. In mittleren und hohen geographischen Breiten treten auch in Zukunft weder Wasser- noch Hitzestress auf. Die erhöhte CO_2 -Konzentration wird dort zu stärkerem Pflanzenwachstum und höheren Erträgen führen, während sich gleichzeitig die Vegetationsperiode durch die CO_2 -bedingte

Temperaturerhöhung verlängern wird. Im Gegensatz dazu führen in niedrigen geographischen Breiten Hitze- und Wasserstress zukünftig zu niedrigerem Pflanzenwachstum. Dies wird durch den direkten Effekt der erhöhten CO₂-Konzentration auf das Pflanzenwachstum nicht ausgeglichen. Demzufolge wird die Ungleichheit zwischen den besser entwickelten Ländern in den gemäßigten Klimazonen und den weniger gut entwickelten Ländern in den Subtropen und Tropen weiter zunehmen (Rosenzweig und Parry 1994; Rosenzweig u. a. 2013). Besonders für weniger entwickelte Länder sind die Folgen des Klimawandels massiv – obwohl andere, besser entwickelte Länder die Hauptverursacher des anthropogenen Klimawandels sind (Hansen und Sato 2016).

In Mitteleuropa sind die erwarteten Hauptauswirkungen des Klimawandels die Verlagerung von Niederschlagsereignissen und -mengen in die Wintermonate (Kovats u. a. 2014; Lindner u. a. 2010; Palmer und Räisänen 2002), sowie die generelle Zunahme von extremen Wetterereignissen (Beniston u. a. 2007; Kovats u. a. 2014) wie zum Beispiel Hitzewellen (Ballester u. a. 2009), sommerlichen Dürren (Folland u. a. 2009; Kovats u. a. 2014; Lindner u. a. 2010) und Sturzfluten während der Pflanzenwachstumsperiode im Sommer (Christensen und Christensen 2003).

Bis 2050 erwarten Milly u. a. (2005), dass die Wasserverfügbarkeit in den hohen Breiten von Eurasien und Nordamerika sowie im östlichen Afrika in der Nähe des Äquators zunehmen wird, während in Südeuropa, Südafrika, dem Mittleren Osten sowie dem Mittleren Westen Nordamerikas weniger Wasser zur Verfügung stehen wird. In allen Regionen, in denen die Wasserverfügbarkeit für das Pflanzenwachstum während der vegetativen Phase abnimmt und dort, wo die Erträge schon jetzt durch Wasserknappheit limitiert sind, müssen Pflanzen angebaut werden, die das Wasser effizienter nutzen, um noch ausreichende Erträge zu erzielen.

1.2 Reaktionen auf veränderte Wasserverfügbarkeit: Messungen und Simulationen

Bewässerung ist ein geeignetes Mittel um die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen zu erhöhen. Deshalb wurden unterschiedliche Bewässerungsmethoden mithilfe von Lysimetern getestet. Skaggs u. a. (2006a,b) maßen und simulierten Wurzelwasseraufnahme und Perkolation von verschiedenen Lysimetern, die mit Luzerne und Weizen gras bepflanzt waren. Sie gaben dabei verschiedene Bewässerungsmengen auf die Lysimeter und änderten außerdem die Salzgehalte des Bewässerungswassers. Sie fanden heraus, dass ihre Simulationen viele gemessene Charakteristika abbilden konnten. Phogat u. a.

(2013) zeigten, dass Perkulationsverluste auch dann hoch sein können, wenn die Wasserzugabe kontrolliert ist. Am Beispiel ihrer Simulationen eines Orangenbaumes wurde dargelegt, dass es möglich ist, den Dünge- und Bewässerungszeitpunkt besser zu planen, und dadurch die Wasseraufnahmeleistung der Pflanzen zu erhöhen. Mithilfe von Tracer-Experimenten unter Verwendung stabiler Isotope wurde der Wasserfluss in Lysimetern ebenfalls bestimmt. Stumpp u. a. (2009) konnten bei einer Bewirtschaftung mit unterschiedlichen Fruchtfolgen reduzierten Wasserfluss sowie weniger Perkolation beobachten im Vergleich zu einer Bewirtschaftung mit Mais-Monokulturen. Diese Ergebnisse konnten während einer langfristigen Studie bestätigt werden: die größte Perkolation bei gleichzeitig niedrigster Durchgangszeit der Isotope wurde in einem Maislysimeter gemessen, während der Fluss des Bodenwassers in mit Winterroggen und Gras bepflanzten Lysimetern geringer war (Stumpp u. a. 2012).

Die Wasseraufnahme durch Pflanzen kann auf unterschiedliche Weise bestimmt werden. Burgess u. a. (2001) benutzten die Heat-Ratio-Methode, um Saftfluss in eingetopften *Eucalyptus marginata* Bäumen zu messen. Gleichzeitig maßen sie die Transpiration der Bäume über die Gewichtsänderung der Pflanztöpfe, wobei die Bodenoberfläche mit Folie abgedeckt war, um Evaporation zu unterbinden. Ihre Saftfluss-Messungen waren eng mit den Transpirations-Messungen korreliert, auch während der Nacht wenn die Transpirationsraten niedrig waren. Die Heat-Ratio-Methode wurde außerdem noch an folgenden weiteren Pflanzen erprobt: Pinien (Vandegehuchte u. a. 2014) Snow-Gum-Eucalyptus und Alpinen Eschen (Buckley u. a. 2011), Olivenbäumen, Apfelbäumen, Asiatischen Birnbäumen sowie Weinreben (Fernández u. a. 2007), diversen Bäumen und Sträuchern in Kalifornien (Fisher u. a. 2007), Nutzpalmern (Madurapperuma u. a. 2009), Regenwaldbäumen des Amazonasgebietes (Oliveira u. a. 2005), sowie *Eucalyptus victrix* Bäumen (Pfausch u. a. 2011).

Die Heat-Ratio-Methode in Verbindung mit Messungen der aktuellen Evapotranspiration wurde auch genutzt, um Evapotranspiration in Evaporation und Transpiration aufzuspalten. Diese Partitionierung ist wichtig, um die genaue Verteilung des Wassers zwischen Boden und Pflanzen zu kennen und somit das Biomassewachstum, das von der Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen abhängt, besser ermitteln zu können (Herbst u. a. 1996; Kool u. a. 2014). Er-Raki u. a. (2010) zeigten, dass mit dem dualen FAO-56 Ansatz sinnvolle Evaporations- und Transpirationswerte eines Olivenhains in Zentralmarokko ermittelt werden konnten. Sie legen außerdem dar, dass eine separate Kenntnis dieser Größen nützlich ist, um Bodenwasserstress zu erkennen und um notwendige Bewässerungsmaßnahmen zu planen. Für Herbst u. a. (1996), die diverse Messungen in einem

Maisfeld in Norddeutschland durchführten, bringen verschiedene Messmethoden wie Porometer, Lysimeter und Bowen-Ratio große Vorteile um eine verlässliche Partitionierung zwischen Evaporation und Transpiration vorzunehmen zu können. Weitere Studien zur Partitionierung von Evapotranspiration wurden mithilfe verschiedener Techniken wie zum Beispiel Lysimetermessungen in Verbindung mit Simulationen durchgeführt: Brisson u. a. (1998) benutzten das Shuttleworth-Wallace-Modell, um die Transpiration von stark bewässerten Sojabohnen auf Lysimetern zu simulieren. Sie fanden heraus, dass der Transpirations-Anteil an der gemessenen Evapotranspiration stark variiert. Sau u. a. (2004) testeten verschiedene Methoden, die potentielle Evapotranspiration über einem Fababohnen-Feld in Spanien zu berechnen und diese anschließend in den Boden- und den Pflanzenanteil aufzusplitten. Dabei fanden sie heraus, dass der Ansatz von Priestley-Taylor die gemessenen Werte besser widerspiegelte als der Ansatz von Penman-FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Ding u. a. (2013) wandten ein modifiziertes Dual-Crop-Koeffizienten-Modell auf ein bewässertes Maisfeld an. Ihre Simulationen waren in der Lage, die gemessene Evapotranspiration (große Lysimeter), Evaporation (Mikro-Lysimeter innerhalb der großen Lysimeter) und Transpiration (Saftflussmessung in Pflanzen auf den großen Lysimetern) gut abzubilden.

1.3 Die Wichtigkeit von Landoberflächenmodellen

In der Klimamodellierung spielt die Partitionierung der Evapotranspiration ebenfalls eine wichtige Rolle, da sie Einfluss auf die simulierten Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre hat. Gemäß Lawrence u. a. (2007) führen höhere Transpirationsraten und niedrigere Evaporationsraten in einem Klimamodell dazu, dass Regenwasser nach einem Niederschlagsereignis länger im Boden verweilt und in tiefere Bodenschichten fließen kann, wo es dann von den Pflanzen aufgenommen wird. Eine erhöhte Evaporationsrate würde hingegen dazu führen, dass mehr Niederschlagswasser direkt aus der obersten Bodenschicht wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Die indirekte „Response“ auf ein Niederschlagsereignis durch Transpiration wird als langsamer und weniger stark, aber auch als länger andauernd betrachtet als die direkte „Response“ durch Evaporation. In der Wetter- und Klimamodellierung bestimmt die Evapotranspiration den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und dieser wiederum Wolkenbildung und Niederschlag. Somit ist also der simulierte Niederschlag unter anderem von der Bo-

denfeuchte und der Partitionierung der Evapotranspiration abhängig (Lawrence u. a. 2007).

Die meisten Landoberflächenmodelle, die als untere Randbedingung für Klimamodelle fungieren (Skamarock u. a. 2008), bilden die Prozesse in Boden und Pflanze nur unzureichend ab (Gayler u. a. 2014; Klein u. a. 2017b; Liu u. a. 2016; Stainforth u. a. 2005). Gewöhnlich benutzen diese Modelle – auch um Rechenzeit zu sparen – sehr einfache Boden- und Pflanzenmodelle, die häufig das dynamische Pflanzenwachstum, landwirtschaftliche Bewirtschaftung und die Bodenphysik ignorieren (Slevin u. a. 2015). Als Konsequenz wird der Wassereintrag in die Atmosphäre zu ungenau abgebildet. Dies wird vor allem dann zum Tragen kommen, wenn die räumliche Auflösung der Wettermodelle aufgrund höherer verfügbarer Rechenleistung größer werden kann. Denn einfache Ansätze, welche auf Durchschnittswerten für ein größeres Gebiet basieren, können zwar im Durchschnitt über ein größeres Gebiet richtige Simulationsergebnisse liefern, aber dennoch an den einzelnen Gitterpunkten stark von tatsächlichen Werten abweichen.

Dieses Problem könnte durch die Kopplung von Atmosphären- mit Boden-Pflanze-Modellen überwunden werden. Doch auch diese bilden teilweise die Wurzelwasseraufnahme und den Bodenwassertransport auf einfache Art ab (Priesack und Gayler 2009). Die Modelle CERES (Crop Environment REsource Synthesis, Jones und Kiniry 1986, Ritchie und Godwin 1989), SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator, Goudriaan und van Laar 1994) und GECROS (Genotype-by-Environment interaction on CROp growth Simulator, Yin und van Laar 2005) benutzen kapazitätsbasierte Modelle zur Simulation von Bodenwasserfluss und -stickstofftransport. Eine andere Möglichkeit für die Beschreibung des Bodenwasserflusses und des Bodenstickstofftransportes ist durch entsprechende Transportmodelle unter Verwendung der Richards-Gleichung oder der Advektions-Dispersions-Transportgleichung gegeben (Priesack 2006). Beispiele für Modelle, die Transportgleichungen nutzen, sind Daisy (Hansen u. a. 1990) oder SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, Kroes und Roelsma 2007). Zusätzlich gibt es noch flexiblere Modellsysteme, welche es dem Anwender erlauben, ein individuelles Modell zusammenzustellen. Das heißt, der Benutzer entscheidet selbst über die Auswahl der einzelnen Modelle. So können unter anderem in den Modellsystemen APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator, Keating u. a. 2003), Expert-N (Priesack 2006) und Theseus (Wegehenkel 2000) sowohl Kapazitätsmodelle als auch Transportmodelle ausgewählt werden.

1.4 Modelle zur Simulation des Wasserflusses in Einzelpflanzen

Um die Wurzelwasseraufnahme mit der Transpiration von Pflanzen in Verbindung zu bringen, müssen die hydraulischen Prozesse innerhalb der Pflanzen berücksichtigt werden. (Brodribb und Holbrook 2004; Katul u. a. 2003; Sperry u. a. 1998). Sollen die Auswirkungen der hydraulischen Austauschprozesse zwischen Boden und Pflanze auf die Transpiration verstanden werden, erfordert dies Kenntnisse über den Wasserfluss in der Pflanze und über das mögliche Einsetzen von Kavitation (Sperry u. a. 2002; Sperry 2000). Simulationen dieses pflanzeninternen Wasserflusses müssen die Architekturen, die Allometrie und das Verzweigungsverhalten der einzelnen Pflanzen berücksichtigen. Dabei ist für diese Simulationen das Lösen von nichtlinearen, dreidimensionalen Transportgleichungen erforderlich, was eine hohe Rechenleistung benötigt. Gleichzeitig sind nur wenige Messdaten vorhanden, die die Validierung eines solchen Wasserflussmodells ermöglichen würden (Bohrer u. a. 2005).

Mit der Annahme, dass der Wasserfluss durch miteinander verknüpfte Trachëiden dem Fluss durch ein poröses Medium ähnelt (Chuang u. a. 2006; Früh und Kurth 1999), lässt sich der pflanzeninterne Wasserfluss mithilfe einer nichtlinearen, partiellen Differentialgleichung – ähnlich der Richards-Gleichung – beschreiben. Bohrer u. a. (2005) simulierten auf diese Art den Wasserfluss im oberirdischen Teil einer fiktiven Fichte, deren Architektur an die reale Baumstruktur angelehnt war. Um die benötigte Rechenleistung zu reduzieren verwendeten sie eine eindimensionale Differentialgleichung und repräsentierten die dreidimensionale Baumstruktur über den Winkel zwischen Zenit und dem jeweiligen Element der Pflanzenstruktur. Dem nichtlinearen Verhältnis zwischen Wasseraufnahme- und Wasserleitfähigkeit wird durch die Berücksichtigung der hydraulischen Eigenschaften der Pflanze und der Pflanzenarchitektur Rechnung getragen, was eine besondere Stärke dieses Modells ist (Bohrer u. a. 2005).

Janott u. a. (2010) erweiterten dieses Modell um eine dreidimensionale Darstellung der Wurzelarchitektur. Damit wurde die Kopplung dieses Xylemwasserflussmodells mit einem Bodenwasserflussmodell ermöglicht, das ebenfalls auf der Richards-Gleichung basiert. Die so simulierten Transpirationraten und Bodenwassergehalte zeigten hohe Übereinstimmung mit Messdaten, die aus Lysimeterexperimenten mit jungen Buchen (*Fagus sylvatica* L.) gewonnen wurden.

Mit diesem Xylemflussmodell konnte auch der gemessene Saftfluss in Buchen des Hainich-Nationalparks reproduziert werden (Bittner u. a. 2012b). Ebenso ermöglichte

das Xylemflussmodell ein besseres Verständnis des Mechanismus, der für das Schließen der Stomata von Bäumen verantwortlich ist. Während die simulierte Transpiration von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Winterlinden (*Tilia cordata*) aufgrund des mittäglichen Schließens der Stomata nur an sehr heißen Tagen abnahm, verringerte sich die simulierte Transpiration von Eschen (*Fraxinus excelsior*) deutlicher, sobald der Xylemwassergehalt niedrig war (Bittner u. a. 2012a).

Hentschel u. a. (2013) zeigten mithilfe des Xylemflussmodells, dass durch das Schließen und Öffnen der Stomata während der lang andauernden Dürreperiode im Sommer 2003 Schäden im Xylem von Buchen auf der Schwäbischen Alb abgewendet werden konnten. In einer weiteren Studie, für die Hentschel u. a. (2015) die Transpiration von 98 Einzelbäumen auf der Schwäbischen Alb mit dem Xylemflussmodell simulierten, stellte sich heraus, dass Heterogenitäten innerhalb eines Baumbestandes in Modellrechnungen berücksichtigt werden sollten, um die Wassernutzung des kompletten Bestandes zu ermitteln.

Da dieses komplexe, mechanistische Xylemflussmodell bisher ausschließlich für die Simulation des Wasserflusses in Bäumen angewandt wurde, soll im Rahmen dieser Dissertation untersucht werden, ob eine Übertragbarkeit des Modells auf Agrarpflanzen wie z. B. Mais möglich ist.

1.5 Skalierung von flächigen Simulationen

Ursprünglich wurden Ackerpflanzenmodelle dazu entwickelt, das Pflanzenwachstum auf einem Feld während einer Wachstumsperiode zu simulieren. Hierzu konnten dem Modell oft örtlich spezifische Wetter-, Boden- und Managementdaten zur Verfügung gestellt werden. In den letzten Jahren wurden jedoch immer mehr Simulationsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Pflanzenwachstum (z. B. Rosenzweig u. a. 2013) durchgeführt. In diesen Studien wurden die Pflanzenmodelle auf großen räumlichen und zeitlichen Skalen angewandt. Diese Vergrößerung der Skalen erfordert jedoch aufgrund der vorhandenen Rechenkapazitäten eine vergleichsweise grobe Auflösung von Ort und Zeit. Neben der räumlichen Inhomogenität von Wetterdaten (Daly 2006), die bei grober Auflösung der Modelle dazu führt, dass nicht alle Prozesse ausreichend gut abgebildet werden, sind die flächendeckende Verfügbarkeit von Wetterstationen (Nonhebel 1994) und die erforderliche Rechenleistung (Zhao u. a. 2013) bei sehr feiner Modellauflösung ein Problem. Um diese Hindernisse zu bewältigen wurden diverse Skalierungsmethoden entwickelt. Dies sind u. a. Datenextrapolation, Datenaggregation,

Dateninterpolation und die Anwendung von geschichteten Zufallsstichproben (Ewert u. a. 2011). Während die Datenextrapolation wenige Punkte innerhalb einer Region nutzt, um diese abzubilden, werden mithilfe der Dateninterpolation aus einer kleinen Menge bekannter Daten hochaufgelöste Daten generiert, um bestehende Heterogenitäten abzubilden. Beide Methoden können jedoch zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führen (Van Wart u. a. 2013). Obwohl Simulationen einzelner Gitterpunkte erfolgreich auf größere Skalen, z. B. auf die ganze Erde (siehe u. a. Rosenzweig und Parry 1994), hochskaliert werden konnten, ist die Größe der Fehler, die bei solch einem Hochskalieren gemacht werden, bisher kaum analysiert worden (Van Bussel u. a. 2016). Nendel u. a. (2013) haben lediglich das Verhältnis zwischen der Anzahl der Stichproben und dem Modellfehler bei einer Simulation des Weizenwachstums in Thüringen analysiert und herausgefunden, dass der mittlere Ertrag besser simuliert werden konnte, wenn im Vergleich zu einer einzelnen Punktsimulation verschiedene Bodendaten und verschiedene Wetter berücksichtigt wurden. Der Zusammenhang zwischen dem Modellfehler und der Anzahl der Stichproben sowie die Übertragbarkeit auf andere Regionen wurden allerdings nicht betrachtet.

Deshalb evaluierten Van Bussel u. a. (2016) die Ergebnisse von Simulationen mit zwölf verschiedenen Pflanzenmodellen, die das Weizenwachstum in Nordrhein-Westfalen von 1982 bis 2011 simulierten. Hierbei wurde ein Durchschnittsboden für das ganze Bundesland angenommen, aber die eingegebenen Wetterdaten wurden auf $1 \times 1 \text{ km}^2$ aufgelöst. Es wurde analysiert, welchen Einfluss die Anzahl der Stichproben für die Hochskalierung (10 bis 34078) auf die simulierten Erträge hat, ob sich für diesen Zweck geschichtete Zufallsstichproben (Ewert u. a. 2011) besser als zufällige Stichproben eignen, und bis zu welchem Maße die Simulationsergebnisse der sich unterscheidenden Pflanzenmodelle untereinander konsistent sind. Im Allgemeinen konnten alle Modelle die Struktur der einzelnen Klimazonen abbilden, jedoch nahmen die Erträge mancher Modelle mit zunehmender Höhe der Gitterpunkte über dem Meeresspiegel zu, während die meisten Modelle eine realistischere Abnahme der Erträge mit der Höhe simulierten. Generell war in allen Simulationen die Variabilität zwischen den einzelnen Jahren höher als die räumliche Variabilität. Der Mittelwert und der Median der simulierten und auf 30 Jahre gemittelten Erträge veränderte sich nur sehr wenig durch eine Reduzierung der Stichprobengröße. Je größer der Bereich war, in denen sich die simulierten Erträge bewegten, desto mehr Stichproben waren nötig, um den Modellfehler gering zu halten. Etwa 100 Gitterpunkte haben sich hierfür als praktikabel herausgestellt. Geschichtete Zufallsstichproben eigneten sich in dieser Studie besser als zufällige Stichproben, da erstere auch bei kleiner

Stichprobenanzahl schneller gegen die Mittelwerte der Erträge konvergierten. Im Allgemeinen hatte jedoch die Modellwahl einen größeren Einfluss auf die simulierten Erträge als die Stichprobengröße oder die Art und Weise der Stichprobennahme.

In gemäßigtem Klima kann auch der Boden einen großen Einfluss auf die zeitliche und räumliche Variabilität von Erträgen haben (Wassenaar u. a. 1999), was bisher sehr selten in Modellstudien untersucht wurde. Deshalb untersuchten Hoffmann u. a. (2016) in einem Folgeprojekt den Einfluss von räumlich aggregierten Eingabedaten, also Wetter und Boden, auf die simulierten Erträge verschiedener Modelle. Hierfür wurden unterschiedliche räumliche Auflösungen (zwischen $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ und ca. $185 \text{ km} \times 185 \text{ km}$) der Boden- und der Wetterdaten miteinander kombiniert. Dabei fanden sie heraus, dass der Niederschlag, die Temperatur, das pflanzenverfügbare Wasser (besonders im Oberboden) und die Tiefe des Bodenprofils einen Großteil der Variabilität in den simulierten Erträgen von Weizen und Mais erklären können. Wenn die räumliche Auflösung der Bodendaten verringert wurde, veränderten sich die Mittelwerte der Erträge stärker als bei der Verwendung räumlich gering aufgelöster Wetterdaten. Die Berechnung des “relativen, mittleren, absoluten Fehlers” (relative mean absolute error, eine Größe, für die der Unterschied zwischen einer hochaufgelösten und einer auf $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ aggregierten Variable auf jedem Gitterpunkt berechnet wird) ergab, dass dieser bei der Verwendung von aggregierten Bodendaten größer oder ähnlich groß war wie die Variabilität zwischen den Modellergebnissen der einzelnen Jahre oder der unterschiedlichen Modelle. Somit ist die Aggregation der Bodendaten eine Quelle großer Unsicherheiten bei der Simulation von Erträgen in Regionen mit unterschiedlichen Böden. Ebenso fanden sie heraus, dass der “relative, mittlere, absolute Fehler” größer wurde, wenn Wetter- und Bodendaten gleichzeitig aggregiert wurden. Negative Aggregationseffekte auf die mittleren Erträge wurden dort gefunden, wo Böden hohes Wasserhaltevermögen hatten; positive Effekte, wo das Wasserhaltevermögen niedrig war. Somit können das Vorzeichen und die Höhe der Aggregationseffekte allein mithilfe des regionalen Niederschlags und dem Wasserhaltevermögen der Böden quantifiziert werden.

Die spezifische Methode für die Auswahl der Standorte, die man als repräsentativ für eine größere Region annimmt, kann ebenfalls dazu beitragen, über eine Region gemittelte Variablen besser abzuschätzen (Roleček u. a. 2007). Aus diesem Grund analysierten Zhao u. a. (2016) mithilfe derselben Modellrechnungen die Genauigkeit von acht unterschiedlichen Arten der Stichprobennahme (sieben geschichtete Zufallsstichproben und eine zufällige Stichprobe). Hierbei errechnete sich der Genauigkeitsgewinn aus zwei mittleren quadratischen Fehlern: dem der zufälligen Stichprobe und einem der

sieben geschichteten Zufallsstichproben. Die mittleren quadratischen Fehler wiederum werden aus dem Unterschied zwischen dem simulierten Ertrag aller Gitterpunkte in einer Schicht und dem simulierten Ertrag von wenigeren Gitterpunkten berechnet. Es wurde der Zusammenhang zwischen einerseits der Genauigkeit und andererseits der Stichprobengröße, den benutzten Variablen beim Erstellen der Stichprobe, der Anzahl der Schichten (also sich nicht überlappende Gruppen von Gitterpunkten), der Pflanzenart und dem Pflanzenmodell untersucht. Bei allen Arten der Stichprobennahme konnte der mittlere quadratische Fehler durch die Erhöhung der Stichprobengröße reduziert werden. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Schichten, die durch die Umweltbedingungen (Wetter, Boden und Gelände kombiniert) oder durch die geographische Lage definiert wurden, nahm die Genauigkeit der Stichprobe deutlich zu, während die Genauigkeit bei der Schichtung mithilfe von Temperatur, Niederschlag oder Strahlung mit zunehmender Schichtanzahl eher abnahm. Die Genauigkeit der Stichprobe nahm bei allen Winterweizen-Modellen zu, wenn mithilfe der geographischen Lage geschichtet wurde, bei den meisten Modellen auch, wenn die Schichtung auf der Bodenart und -tiefe oder den Umweltbedingungen basierte. Bei Mais hatte zusätzlich die Schichtung mit der Temperatur bei den meisten Modellen einen positiven Effekt auf die Genauigkeit.

Kapitel 2

Material und Messmethoden

Notwendige Messungen für diese Dissertation wurden auf der Lysimeteranlage des Helmholtz Zentrums München, Neuherberg, Deutschland sowie auf Feldern der Forschungsplattform Scheyern durchgeführt. Beide Plattformen sowie die einzelnen Messmethoden sollen in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden. Alle Photographien in diesem Kapitel sind – soweit nicht anderweitig gekennzeichnet – im Rahmen dieser Dissertation entstanden.

2.1 Die Lysimeteranlage in Neuherberg

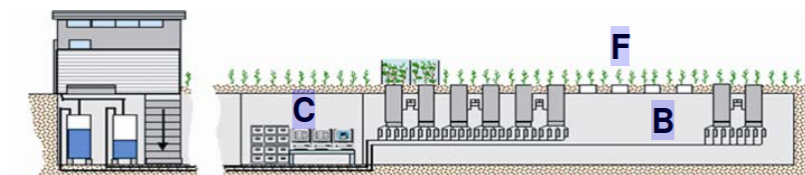
2.1.1 Allgemeines

Die Lysimeteranlage auf dem Gelände des Helmholtz Zentrums München ($48^{\circ} 13' 24''$ N, $11^{\circ} 35' 48''$ O) wurde im Jahr 1995 eingeweiht (UMS AG 2016) und war bis Ende 2014 in Betrieb. Von 1961 bis 1990 betrug der mittlere jährliche Niederschlag 804 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur $7,8^{\circ}\text{C}$ (Klier 2007). Die Lysimeteranlage befand sich in der Mitte einer 1 ha großen, bewirtschafteten Fläche und konnte mit bis zu 48 Lysimetern ausgestattet werden. Ein Luftbild sowie der Querschnitt der Lysimeteranlage sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Alle Lysimeterzylinder bestanden aus rostfreiem Edelstahl und hatten ein Volumen von 2 m^3 sowie eine Grundfläche von 1 m^2 . Die Zylinder wurden auf drei Hochpräzisions-Waagen gelagert, was einer Messgenauigkeit von 100 g bzw. 0,1 mm Wassersäule entspricht. Die zumeist direkt gestochenen Bodensäulen innerhalb der Lysimeterzylinder hatten ein Gewicht von etwa 5 t. Wägbare Sickerbehälter (60 l Fassungsvermögen) ermöglichten außerdem das Messen der Perkolation. Diese hatten eine Genauigkeit von 10 g bzw. 0,01 mm Wassersäule (Winkler u. a. 2009). Bei vier Lysimetern war zusätzlich



(a) Luftbild der Lysimeteranlage



(b) Querschnitt der Lysimeteranlage

Abbildung 2.1: Überblick über die Lysimeteranlage (aus dem Bestand des ehemaligen Instituts für Bodenökologie des Helmholtz Zentrums München): (a) Luftbild, (b) Querschnitt, wobei C den Kontrollraum darstellt, F das Feld und B den Lysimeterkeller. Das hintere Ende des Luftbildes befindet sich im Querschnitt ganz rechts

der untere Ausfluss in 8 Bereiche eingeteilt, was es ermöglichte, den heterogenen Wasserfluss in der nicht-gesättigten Zone zu ermitteln. Die Lysimeter waren zusätzlich in 5 Tiefen (30, 50, 80, 155 und 190 cm) mit Saugkerzen, Tensiometern, TDR-Sonden (Time-domain-reflectometry-Sonden), und Temperatursensoren ausgestattet (Reth u. a. 2007). Der Querschnitt eines Lysimeters ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die einzelnen Messwerte konnten online über das eigens programmierte Visualisierungsprogramm *LDVisu* abgerufen werden.

Der radioaktive Überwachungsbereich mit 16 Lysimetern diente vor allem zur Durchführung von Tracer-Versuchen, so konnten zum Beispiel Heterogenitäten innerhalb des Bodenprofils und bevorzugte Fließpfade ermittelt werden. Auch wurde durch radioaktive Markierung das Verhalten des Herbizids Glyphosat in Boden und Pflanze getestet (Klier 2007). Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt der Lysimeteranlage war das Verhalten des klimarelevanten Spurengases N_2O im Boden. Hierfür wurde die N_2O -Konzentration in der Bodenluft in fünf Tiefen gemessen sowie der N_2O -Anteil im Sickerwasser ermittelt. Auch wurde eine klimabedingte Temperaturerhöhung an einzelnen

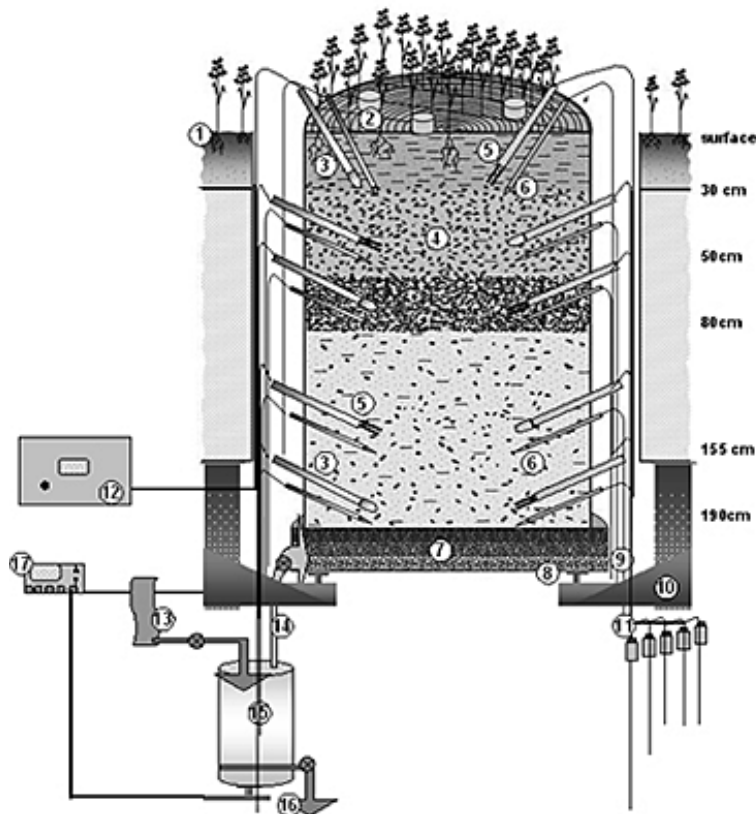


Abbildung 2.2: Querschnitt eines Lysimeters inklusive Instrumentierung (aus Reth u. a. 2007): 1 Feld, 2 Gasmesskammer, 3 Tensiometer, 4 Boden, 5 TDR-Sonde, 6 Gassammelsonde, 7 Filterboden mit unterschiedlich grober Körnung, 8 Wägezellen, 9 Teflonschlauch, 10 Tragehalterung, 11 Gasgefäße, 12 Logger, 13 Linde Plastiglas Beutel, 14 Auslauf, 15 Sickerbehälter, 16 Wägezelle des Sickerbehälters, 17 Gewichtsanzeige

Lysimetern durch das Anbringen von Heizspiralen simuliert, sodass Veränderungen der N_2O -Emissionen aus dem Boden simuliert werden konnten. Ein weiterer größerer Versuch war die Untersuchung des Einflusses von Stressfaktoren, wie zum Beispiel Ozon-Begasung, auf das Boden-Pflanzen-System am Beispiel junger Buchen.

2.1.2 Versuchsaufbau

In den Jahren 2012, 2013 und 2014 wurden auf zwei Lysimetern jeweils 10 Maispflanzen in 3 cm Tiefe ausgesät. Diese Lysimeter sowie zwei benachbarten Referenzlysimeter wurden im Jahr 2002 mit sandigem Boden befüllt. Da beim Befüllen die Lagerungsdichte nicht ermittelt wurde, schätzte Klier (2007) diese auf $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$. Der Boden kann als *Haplic Arenosol* (Klier 2007) klassifiziert werden und stammt aus Neumarkt in der



(a) 30. Mai 2012



(b) 11. Juni 2012



(c) 18. Juni 2012



(d) 25. Juni 2012



(e) 3. Juli 2012



(f) 26. Juli 2012



(g) 14. August 2012



(h) 21. August 2012



(i) 6. September 2012

Abbildung 2.3: Entwicklung der Maispflanzen auf Lysimeter 43 von 30. Mai bis 6. September 2012



Abbildung 2.4: Installierte Saftflusssensoren, Dendrometer sowie Abdeckung des Bodens

Tabelle 2.1: Bodeneigenschaften und hydraulische Charakteristika der für diese Dissertation verwendeten Lysimeter (modifizierte Tabelle aus Klier 2007). C_{org} ist der Gehalt des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden. θ_{sat} ist der Bodenwassergehalt bei Sättigung, ermittelt durch gravimetrische Messungen. K_{sat} bezeichnet die hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung, die mit dem Hutson & Cass-Burdine-Ansatz berechnet wurde (Vereecken u. a. 1990).

Horizonttiefe [cm]	Typ	C_{org} [kg dm ⁻³]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	θ_{sat} [cm ³ cm ⁻³]	K_{sat} [mm d ⁻¹]
0 - 30	Ss	0,95	4	8	88	0,25	1653
30 - 50	Ss	0,60	4	8	88	0,25	1653
50 - 80	Ss	0,30	3	5	92	0,25	1573
80 - 200	Ss	0,09	1	1	98	0,25	2313



(a)



(b)

Abbildung 2.5: Zwei mit Mais bepflanzte Lysimeter, (a) ohne und (b) mit Schattiernetz

Oberpfalz. Tabelle 2.1 zeigt Bodeneigenschaften und hydraulische Charakteristika der Lysimeter (Klier 2007). Diese wurden jedoch für die Modellrechnungen (siehe Kapitel 4.2) teilweise angepasst und neu geschätzt, um die gemessenen Bodenwassergehalte möglichst gut im Modell abzubilden.

Um ein schnelles Auflaufen der angesäten Maispflanzen zu begünstigen, wurden jeweils direkt nach der Aussaat 10 l Wasser angegossen. Die Saatdaten auf beiden, verwendeten Lysimetern waren jeweils der 29. Mai 2012, der 24. Mai 2013 und der 10. Juni 2014. Im Jahr 2012 wurden vor der Aussaat Bodenproben entnommen, um den Stickstoffgehalt im Oberboden zu bestimmen. Um möglichst kräftige Pflanzen zu erhalten, wurde in den Jahren 2013 und 2014 nach dem Auflaufen die Anzahl der Pflanzen auf 5 pro Lysimeter verringert. Außerdem wurde darauf geachtet, Unkraut händisch zu ent-

fernen. Dünger (90g, 7% organischer N, 4% P_2O_5 und 1% K_2O) wurde nur am 18. Juli 2014 ausgebracht. Die Entwicklung der Maispflanzen auf Lysimeter 43 im Jahr 2012 wird in Abbildung 2.3 gezeigt.

Sobald die Pflanzenstängel die notwendige Dicke von 1,5 cm erreicht hatten, wurden Heat-Ratio-Saftflusssensoren von *ICT International Pty Ltd*, Australien, installiert, aufgrund einer verspäteten Lieferung der Messgeräte im Jahr 2012 erst ab Mitte September. Im Jahr 2014 wurden zusätzlich Durchmesser-Dendrometer an den Pflanzen angebracht, um Veränderungen im Stängeldurchmesser zu messen. Des Weiteren wurde in diesem Jahr der Boden für einen gewissen Zeitraum abgedeckt, sodass die Gewichtsänderung des Lysimeters nahezu ausschließlich durch pflanzliche Transpiration sowie eventuellen Niederschlag verursacht wird. Abbildung 2.4 zeigt den Messaufbau im Jahr 2014.

Um einen geschlossenen Bestand zu simulieren wurden teilweise während der Perioden, in denen Saftflussmessungen stattfanden, lichtdurchlässige Schattiernetze um die bepflanzten Lysimeter herum installiert (siehe Abbildung 2.5).

Aufgrund eines Messgerätedefektes stehen für diese Dissertation die gemessenen Wassergehalte nur in 50 cm und 80 cm Tiefe zur Verfügung.

2.2 Die Forschungsplattform Scheyern

2.2.1 Allgemeines

Nachdem das Kloostergut Prielhof in Scheyern (40 km nördlich von München, $48^\circ 29,4'$ N, $11^\circ 26'$ O) 15 Jahre lang von der Technischen Universität München als Forschungsplattform im Rahmen des Forschungsverbundes Agrarökosysteme München (FAM) gepachtet wurde, führte das Helmholtz Zentrum München ab dem Jahr 2005 die Pacht weiter. Ende des Jahres 2015 endete der Pachtvertrag und der Prielhof wird nunmehr vom Kloster selbst bewirtschaftet. Ein Luftbild des Hofes mit einem kleinen Teil der dazugehörigen Felder ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Das Gebiet der Forschungsplattform Scheyern liegt zwischen 440 und 500 m über dem Meeresspiegel. Aus Gründen des Erosionsschutzes sind die einzelnen Parzellen in dieser hügeligen Landschaft klein. Als die Forschungsplattform Scheyern noch vollständig genutzt wurde, war sie ausreichend groß, um die Folgen des Klimawandels auf ein landwirtschaftlich genutztes Ökosystem zu untersuchen. Im Rahmen von TERENO (TERrestrial ENvironmental Observatories), einem interdisziplinären Forschungspro-



Abbildung 2.6: Luftbild des Prielhofs mit umgebenden Feldern (aus dem Bestand des ehemaligen Instituts für Bodenökologie des Helmholtz Zentrums München)

gramm von sechs verschiedenen Helmholtz-Zentren, wurden in Scheyern Stoffflüsse in terrestrischen Ökosystemen über einen längeren Zeitraum gemessen und analysiert. TERENO ermöglichte den Aufbau des Messnetzes SoilNet (Jagdhuber u. a. 2012), einer Eddy-Kovarianz-Station und von Feldlysimetern. Weitere Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2005 bis 2015 in Scheyern waren die Untersuchung von Agroforstsystemen, der Rohstoffqualität unter Berücksichtigung von Stressfaktoren, der Auswirkungen von unterschiedlichen Bewirtschaftungspraktiken auf Stoffflüsse und Erträge, von Mykotoxinen in der menschlichen Nahrung, sowie von Resistenzen gegen Antibiotika in der Landwirtschaft. Abbildung 2.7 zeigt eine Karte des Versuchsguts und wie die einzelnen Schläge wissenschaftlich genutzt wurden.

2.2.2 Feldmessungen, Bewirtschaftung, Böden und Klima

Im Jahr 2014 (Parzelle IA) und im Jahr 2015 (Schlag A17) wurden Saftflusssensoren in Maispflanzen installiert. Auf dem Schlag A17 waren insgesamt 4 Pflanzen mit Saftflusssensoren ausgestattet. Zwei Pflanzen erhielten lediglich einen Sensor, während der Saftfluss der zwei anderen Pflanzen in unmittelbarer Bodennähe sowie oberhalb der untersten zwei Blätter gemessen wurde. Zusätzlich wurden im Jahr 2015 an allen vier Pflanzen Dendrometer angebracht. Zwischen den Schlägen A17 und A18 befindet sich außerdem eine Eddy-Kovarianz-Station, welche die Energieflüsse zwischen Boden,

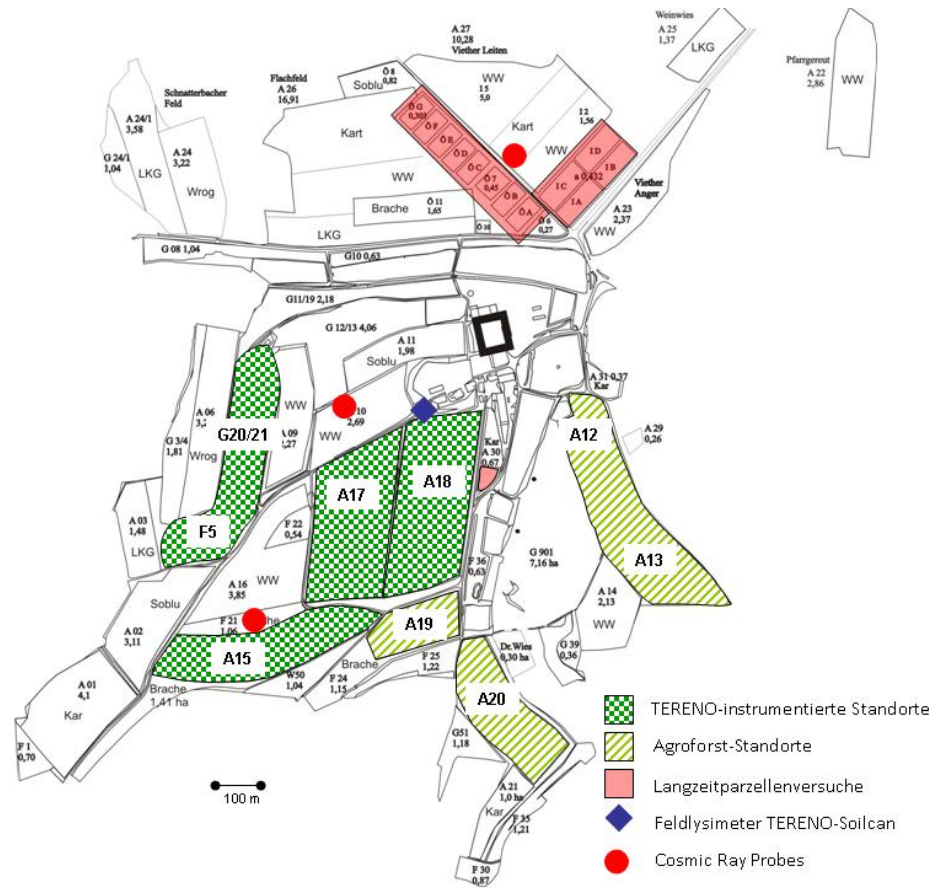


Abbildung 2.7: Überblick über die einzelnen Schläge und die wissenschaftliche Nutzung des Versuchsguts Scheyern (aus dem Bestand des ehemaligen Instituts für Bodenökologie des Helmholtz Zentrums München)

Pflanze und Atmosphäre misst und somit Rückschlüsse auf die Evapotranspiration von Boden und Pflanzen ermöglicht.

In den Jahren 2013 und 2015 wurden außerdem terrestrische Laserscans (TLS) einzelner Pflanzen sowie kleinerer Pflanzengruppen vorgenommen, um die dadurch gewonnenen Pflanzenarchitekturen als Eingabeparameter für ein Modell zur Beschreibung des Wasserflusses in einzelnen Pflanzen zu nutzen. Im Jahr 2015 wurden außerdem noch die Höhenverteilung der Blattflächen einzelner Maispflanzen sowie nach der Ernte die horizontale und vertikale Verteilung der Wurzeln gemessen.

Das Klima in Scheyern ist feucht-kontinental geprägt. Das dreißigjährige Temperaturmittel beträgt $7,4^{\circ}\text{C}$, die über 30 Jahre gemittelte, jährliche Niederschlagssumme 803 mm (Sommer u. a. 2003). Die Bodeneigenschaften des Schlags A17 sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Bodeneigenschaften des Schlags A17 der Forschungsplattform Scheyern

Tiefe [cm]	Horizont	Typ	Lagerungsdichte [kg dm ⁻¹]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	pH [-]
-24 - 0	Ap	Lu	1,46	18,9	59,1	22,0	5,9
0 - 10	x AhBv	Tu3	1,62	30,1	53,4	16,5	6,2
10 - 14	AhBv	Lu	1,52	27,5	52,8	19,7	6,2
14 - 44	Bv1	Lt2	1,61	28,8	49,4	21,8	6,3
44 - 77	Bv2	Tu3	1,61	30,5	56,2	13,3	5,7

2.3 Wasserbilanzmessungen durch Lysimeter

Das Gewicht der Lysimeter m_{Lysi} [kg] sowie das Gewicht der Sickerbehälter m_{out} [kg] wurden stündlich aufgezeichnet. Da die Daten der Wetterstation in der Lysimeteranlage nur sehr lückenhaft verfügbar waren, wurde auf Messdaten des meteorologischen Messturms in Garching, welcher vom Meteorologischen Institut München (MIM) betrieben wird, zurückgegriffen. Um Änderungen der Lysimeterwasserbilanz zu bestimmen, wurden zusätzlich zu den mit Mais bepflanzteten Lysimetern (Nummer 43 und 45) zwei unbewirtschaftete, benachbarte Lysimeter (Nummer 41 und 47) genutzt. Dies half auch dabei, kleinere Gewichtsänderungen durch Wind oder Tiere auf den Lysimetern herauszufiltern. Zunächst wurde die jeweilige Gesamtmasse von allen vier Lysimetersystemen bestimmt:

$$m_{tot}[\text{kg}] = m_{Lysi} + m_{out}. \quad (2.1)$$

Danach wurde zu jeder Stunde i die Gewichtsänderung des Gesamtsystems im Vergleich zur Stunde $i - 1$ berechnet:

$$\Delta m_{tot}(i) = m_{tot}(i) - m_{tot}(i - 1). \quad (2.2)$$

Wenn $\Delta m_{tot}(i)$ kleiner als 0,1 kg war, wurde $m_{tot}(i - 1)$ $m_{tot}(i)$ zugeordnet. Wenn hingegen $\Delta m_{tot}(i)$ größer als 0,1 kg war, wurde ein Niederschlagsereignis angenommen. Andernfalls wurde der Niederschlag auf 0 gesetzt. Da in gemäßigten Klimazonen die Evapotranspiration normalerweise niedriger als der Niederschlag ist, war die einzige Bedingung für das Auftreten von Evapotranspiration, dass $\Delta m_{tot}(i)$ kleiner als 0 war.

2.4 Saftflussmessung: Die Heat-Ratio-Methode

Die Heat-Ratio Methode verwendet zwei Messnadeln mit jeweils zwei Messpunkten. Diese Nadeln wurden in diesem Versuchsaufbau 0,5 cm oberhalb und unterhalb einer Heiznadel in der Pflanze installiert. Wenn die Heiznadel einen Hitzepuls auslöst, wird das Verhältnis der Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_1/\Delta\vartheta_2$ [$^{\circ}\text{C } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] der zwei Messnadeln im Vergleich zu ihrer jeweiligen Ausgangstemperatur (vor Auslösen des Hitzepulses) gemessen. Hiermit kann dann die Geschwindigkeit des Hitzepulses V_h [cm h^{-1}] berechnet werden (Marshall 1958):

$$V_h = k_s/x \ln(\Delta\vartheta_1/\Delta\vartheta_2)3600, \quad (2.3)$$

wobei x (0,5 cm) der Abstand zwischen Heiznadel und dem jeweiligen Temperatursensor und 3600 [s h^{-1}] ein Umrechnungsfaktor ist. Um die Wärmeleitzahl k_s [cm^2s^{-1}] zu bestimmen entwickelten Burgess u. a. (2001) eine Methode, welche Frischmasse m_{fr} [kg] und -volumen V_{fr} [m^3] sowie getrocknete Masse m_{tr} [kg] einer Biomasseprobe benötigt. Als Ausgangspunkt hierfür dient Gleichung 8 aus Marshall (1958):

$$k_s = 10000 \frac{K_{fr}}{\rho_{fr}c_{fr}}, \quad (2.4)$$

wobei K_{fr} [$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$] die thermische Leitfähigkeit, ρ_{fr} [kg m^{-3}] die Dichte und c_{fr} [$\text{J kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$] die spezifische Wärmekapazität von frischem (grünen) Pflanzenmaterial ist.

K_{fr} kann dann mit einem modifizierten Ansatz gemäß Swanson (1983) bestimmt werden:

$$K_{fr} = K_s\theta_s \frac{\rho_b}{\rho_w} + K_{tr}(1 - \theta_s \frac{\rho_b}{\rho_w}), \quad (2.5)$$

wobei θ_s der Wassergehalt, berechnet als (Frischmasse - Trockenmasse) / Frischmasse, und ρ_b die Rohdichte (Trockenmasse / Frischvolumen) des Pflanzenmaterials sind. ρ_w ist die Dichte von Wasser. K_s und K_{tr} sind die thermischen Leitfähigkeiten von Wasser ($0,5984 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ bei $20 ^{\circ}\text{C}$ nach Lide 1991) und von getrocknetem Pflanzenmaterial. Letztere kann mit folgender empirischen Gleichung bestimmt werden:

$$K_{tr} = 0,04182(21,0 - 20,0F_v), \quad (2.6)$$

wobei F_v der Leerraumanteil im Pflanzenmaterial ist und gemäß Swanson (1983) berechnet werden kann:

$$F_v = 1 - \left(\frac{\rho_b 0,6536 + \theta_s}{1000} \right). \quad (2.7)$$

Die spezifische Wärmekapazität von frischem Pflanzenmaterial aus Gleichung 2.4 kann modifiziert nach Edwards und Warwick (1984) berechnet werden:

$$c_{fr} = \frac{m_{tr}c_p + c_w(m_{fr} - m_{tr})}{m_{fr}}. \quad (2.8)$$

Hier sind c_p und c_w die spezifischen Wärmekapazitäten von Pflanzenmaterial (1200 J kg⁻¹ °C⁻¹ bei 20 °C nach Becker und Edwards 1999) und Wasser (4182 J kg⁻¹ °C⁻¹ bei 20 °C nach Lide 1991).

Eine geringe ungenaue Ausrichtung der zwei Messnadeln könnte jedoch zu Fehlern bei der Berechnung von V_h führen. Ist die Ausrichtung nur um 1 mm verschoben, können Messfehler von ca 20 % auftreten. Deshalb wird bei der Heat-Ratio-Methode der genaue Ort der Messnadeln *in situ* gemessen. Anhand der Positionen der beiden Messnadeln x_1 und x_2 kann V_h ebenfalls bestimmt werden:

$$V_h = 3600 \left(\frac{x_1 + x_2}{2t} \right), \quad (2.9)$$

wobei t die Zeit ist, welche nach Auslösen des Hitzepulses benötigt wird, um das thermische Gleichgewicht wieder herzustellen. Setzt man in Gleichung 2.3 $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ und kombiniert diese mit Gleichung 2.9 erhält man für x_2 unter der Annahme, dass Nadel 1 korrekt, aber Nadel 2 ungenau platziert ist:

$$x_2 = x_1 + \sqrt{(4k_s t \ln(\Delta\vartheta_1/\Delta\vartheta_2))}. \quad (2.10)$$

Wenn x_1 und x_2 bestimmt sind, kann man mithilfe der Arbeit von Marshall (1958) eine korrigierte Geschwindigkeit des Hitzepulses V_h bestimmen:

$$V_h = 3600 \left(\frac{4k_s t \ln(\Delta\vartheta_1/\Delta\vartheta_2) - x_2^2 + x_1^2}{2t(x_1 - x_2)} \right). \quad (2.11)$$

Das Einführen der Nadeln in die Pflanzen verursacht mechanischen Schaden an den Pflanzen, nicht nur durch direktes unterbrechen der Fließwege sondern auch durch Verstopfen intakter Leitungsbahnen mit Methylzellulosen (Barrett u. a. 1995). Deshalb sollten zusätzliche Verwundungskorrekturen vorgenommen werden. Burgess u. a. (2001) schlagen hierfür ein einfaches, numerisches Modell vor, um eine korrigierte Geschwin-

digkeit des Hitzepulses V_k zu bestimmen, wobei die Koeffizienten β_1 , β_2 , und β_3 von der Größe der Wunde abhängen:

$$V_k = \beta_1 V_h + \beta_2 V_h^2 + \beta_3 V_h^3. \quad (2.12)$$

Da nur ein Teil des Xylems tatsächlich auch Saft transportiert, messen die Hitzepulssensoren ein gewichtetes Mittel der Geschwindigkeit von transportiertem Saft und statischem Pflanzenmaterial (Marshall 1958). Deshalb müssen in diesem letzten Schritt noch die flüssigen und festen Anteile im Xylem berücksichtigt werden, um die Saftgeschwindigkeit V_s zu berechnen (Barrett u. a. 1995):

$$V_s = \frac{V_k \rho_b (c_p + \theta_s c_w)}{\rho_w c_w}. \quad (2.13)$$

Einzelne Ausreißer wurden aus den Rohdaten entfernt, falls ein Grenzwert von $V_h = 60 \text{ cm h}^{-1}$ überschritten wurde. Die Nulllinie der Messdaten wurde durch Saftflussmessung nach der Seneszenz ermittelt, da in diesem Zeitraum kein nennenswerter Saftfluss mehr stattfindet. Um einen besseren Vergleich mit Modellrechnungen und Wetterdaten in stündlicher Auflösung herzustellen, wurden außerdem stündliche Mittelwerte der Saftgeschwindigkeiten berechnet.

Alle hier vorgestellten Methoden und Korrekturen wurden für diese Dissertation unter Zuhilfenahme der Software *Sap Flow Tool* (Version 1.4, *ICT International/Phyto-IT*) durch Eingabe der notwendigen messbaren Größen vorgenommen.

Im Falle der Lysimeterstudie im Jahr 2013 (Abschnitte 4.2 und 5.1) wurde außerdem noch die Gesamttranspiration des Lysimeters [mm h^{-1}] bestimmt. Hierfür wurden die stündlichen Saftflussgeschwindigkeiten aller Pflanzen mit den entsprechenden Xylemdurchmessern multipliziert, aufaddiert und durch die Lysimeterfläche geteilt. Auf ähnliche Art wurde aus den Saftflussmessungen auf der Versuchsplattform Scheyern im Jahr 2015 die tägliche Transpiration [mm d^{-1}] bestimmt und mit Simulationsergebnissen verglichen (Abschnitte 4.3 und 5.2).

2.5 Terrestrische Laserscans

Als Eingabeparameter für Xylemwasserfluss-Simulationen (siehe Abschnitt 4.3) wurden oberirdische Pflanzenarchitekturen benötigt. Neben der Simulation fiktiver Pflanzenarchitekturen, wurden auch dreidimensionale, terrestrische Laserscans (TLS) mit dem terrestrischen Laserscanner *Riegl VZ-400* (*Riegl GmbH, Horn, Österreich*) durchge-

führt, um die Pflanzenarchitekturen zu bestimmen. Im Jahr 2013 wurden hierbei TLS in der Lysimeteranlage in Neuherberg von allen Maispflanzen auf den zwei Lysimetern angefertigt, sobald die Pflanzen ihre volle Größe erreicht hatten. Des Weiteren wurden TLS von einzelnen Pflanzen in den Jahren 2013 und 2015 auf dem Versuchsgut Scheyern durchgeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Entwicklungsstadien der Pflanzen berücksichtigt. Die Pflanzen, deren Saftfluss gemessen wurde, konnten jedoch erst kurz vor der Ernte aufgenommen werden, um bis zum Ende der Messperiode eine realistische Umgebungssituation aufrecht zu erhalten. Für das Scannen mussten die umliegenden Pflanzen zunächst geerntet werden, um ausreichenden Abstand zwischen dem Laserscanner und den zu scannenden Maispflanzen herzustellen.

Die Aufstellung von (mehr als 10) Reflektoren ermöglichte, nachdem jede Pflanze bzw. jede Pflanzengruppe aus vier unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurde, ein Zusammensetzen der einzelnen Scans. Diese liegen bei dem benutzten Laserscanner grundsätzlich als dreidimensionale Punktwolken vor, wobei ein Punkt genau dann entsteht, wenn ein ausgesendeter Strahl des Lasers von einem Objekt reflektiert wird. Der Abstand eines Punktes zum Laserscanner wird hierbei durch die Zeit ermittelt, die ein einzelner Laserstrahl benötigt, um wieder am Laserscanner einzutreffen. Der Abstand zwischen den einzelnen Laserstrahlen wurde je nach Abstand zu den Pflanzen zwischen $0,01$ und $0,04^\circ$ gewählt, minimal wären $0,0024^\circ$ möglich gewesen. Ein Nachteil dieses Messprozesses ist, dass für die Zeit einer Aufnahme (etwa 30 Sekunden) nahezu Windstille benötigt wird. Andernfalls entstehen Artefakte, welche im schlechtesten Fall das Übereinanderlegen der einzelnen Scans verhindert.

Unter Verwendung der Software *RiScanPro* (Version 1.6.0) (*Riegl* GmbH, Horn, Österreich) wurden die vier Scans einzelner Pflanzen oder Pflanzengruppen zusammengesetzt und die Punktwolken der Einzelpflanzen manuell ausgeschnitten. Nach Abspeichern der dreidimensionalen Koordinaten der einzelnen Punkte wurde ein Skelett-Extraktions-Algorithmus (Verroust und Lazarus 2000, Xu u. a. 2007) auf die Punktwolken angewendet. Dieser Algorithmus erstellte ein Abbild der Pflanzen aus verbundenen Zylinderelementen, welche eine genaue Position und Orientierung haben. Der Algorithmus benötigte hierfür die Länge der Zylinderelemente und einen Suchradius, um diejenigen Punkte zu bestimmen, die für die Orientierung des nächsten Zylinderelementes relevant sind. Die einzelnen Zylinderelemente stellten nun Segmente des Stängels oder einer fiktiven Linie in der Blattmitte dar. Ein Problem hierbei war jedoch, dass die Algorithmen typische Baumverzweigungsmuster (vgl. Abbildung 2 in Hentschel u. a. 2013) erstellten, z. B. konnte dank hoher Punktdichte bei den Blättern bzw. aufgrund

von am Stängel zunächst enganliegenden Blättern kein gerader Stängel extrahiert werden. Deshalb mussten die extrahierten Skelette in einem weiteren Schritt noch manuell angepasst werden. Diese Schritte wurden für einige Pflanzen von Marius Bickel im Rahmen seiner Werkstudententätigkeit am Helmholtz Zentrum München und von mir selbst durchgeführt.

2.6 Messungen der Veränderung der Stängeldurchmesser bei Mais

Die Veränderung der Stängeldurchmesser von Maispflanzen wurden unter Verwendung von Durchmesser-Dendrometern (DD-S, Ecomatik) gemessen. Im Sommer 2014 wurden die Dendrometer an allen Maispflanzen auf der Lysimeteranlage in Neuherberg (siehe Abbildung 2.8) installiert. Dieser Zeitraum ist jedoch eher als Probe- und Testphase zu sehen, da das notwendige Wissen und die notwendige Stromversorgung für die Installation nicht mehr am Institut vorhanden waren. Letztere wurde dann inklusive Anleitung erst nach dem Absterben der Pflanzen geliefert, sodass ausschließlich ein prinzipieller Verlässlichkeitstest für einen einzelnen Zeitpunkt durchgeführt wurde. Im Sommer 2015 wurden jedoch auf der Forschungsplattform Scheyern die Pflanzen, deren Saftfluss gemessen wurde, erfolgreich mit Dendrometern beprobt. Die hier verwendeten Dendrometer sind für Pflanzen mit einem Durchmesser bis zu 5 cm geeignet und verletzen die Pflanzen nicht. Sie sind zwischen -30 und 40 °C sowie unabhängig von der Luftfeuchte



Abbildung 2.8: Installiertes Dendrometer an einer Pflanze auf einem Lysimeter in Neuherberg am 26. September 2014

einsetzbar. Die hier eingesetzten Dendrometer können Änderungen des Durchmessers von bis zu 11 mm bei einer Genauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ messen. Als Messintervall wurde 10 Minuten gewählt.

Die Auslenkung der Dendrometer x_D [μm] wurde nach folgender Formel berechnet:

$$x_D = \frac{U_{out}}{U_{in}} * 11000, \quad (2.14)$$

wobei U_{out} die gemessene Ausgabespannung der Dendrometer [mV] und U_{in} die Versorgungsspannung (2000 mV) ist. 11 000 μm ist ein messgerätspezifischer Umrechnungsfaktor.

2.7 Eddy-Kovarianz: Messung des latenten Wärmeflusses

Im Sommer 2015 waren die Saftflusssensoren in Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern installiert. Dieser Schlag befindet sich neben einer Eddy-Kovarianz-Station (siehe Abbildung 2.9). Somit bestand die Möglichkeit, zusätzlich den latenten Wärmefluss von Boden und Pflanzen mit dieser Standardtechnik (vgl. Baldocchi u. a. 1988, Aubinet u. a. 1999 und Baldocchi 2003) zu messen. Die Vorteile von Eddy-Kovarianz-Messungen sind u. a. die flächige Messung von Flüssen, die hohe zeitliche Auflösung der Messungen und die Nicht-Beeinträchtigung der Oberfläche, aus der die Flüsse gemessen werden. Nachteile sind u. a., dass für die Messung Luftturbulenz vorherrschen muss und daher Datenlücken auftreten können, sowie dass eine Eddy-Kovarianz-Station nicht leicht versetzt werden kann. Generell funktioniert diese Methode am Besten in ebenem Gelände, wenn die atmosphärischen Bedingungen stabil sind und wenn die Vegetation auf der Messfläche homogen ist.

Als Ausgangspunkt für die Eddy-Kovarianz-Theorie betrachtet man die Turbulenz. Diese lässt sich leicht, z. B. an rauchenden Schornsteinen, beobachten, sie ist aber aufgrund ihres chaotischen Verhaltens mathematisch schwierig zu beschreiben. Deshalb bedient man sich einer statistischen Beschreibung, welche eine Variable, z. B. die vertikale Windgeschwindigkeit w [m s^{-1}] in die Summe aus Mittelwert \bar{w} und Abweichung w' , welche die Turbulenz beschreibt, aufteilt:

$$w = \bar{w} + w'. \quad (2.15)$$



Abbildung 2.9: Eddy-Kovarianz-Station der Forschungsplattform Scheyern am 27. Oktober 2015

Im Allgemeinen verändert sich hier der Mittelwert im Laufe der Zeit nur wenig. Die gemittelte Abweichung ist zudem per Definition Null.

Jedes Luftteilchen transportiert des Weiteren gewisse Eigenschaften, wie zum Beispiel Temperatur, CO_2 -Konzentration oder spezifische Luftfeuchte. Letztere ist die zweite, hier zu betrachtende Größe q [kg kg^{-1}], die sich in $q = \bar{q} + q'$ aufteilen lässt. Das gemittelte Produkt dieser Variablen, \overline{qw} , ist dann der mittlere vertikale Fluss der spezifischen Feuchte:

$$\overline{qw} = \bar{q}\bar{w} + \overline{q'w'}. \quad (2.16)$$

Der Term $\overline{q'w'}$ ist hier gleichzeitig die Kovarianz zwischen vertikaler Windgeschwindigkeit und spezifischer Feuchte:

$$\overline{q'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (q_i - \bar{q})(w_i - \bar{w}) = \text{cov}(q, w). \quad (2.17)$$

Gleichung 2.16 zeigt also dass sich der mittlere vertikale Fluss der spezifischen Feuchte aus zwei Summanden zusammensetzt: Fluss aufgrund von gemittelter Bewegung, welcher klein ist, und Fluss aufgrund von Turbulenz, welcher hier dominiert. Durch Multiplikation von Gleichung $\overline{q'w'}$ mit der Dichte von Luft ρ_l [kg m^{-3}] erhält man schließlich den vertikalen Fluss von Wasserdampf E_q [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]:

$$E_q = \rho_l \overline{q'w'}. \quad (2.18)$$

Um schließlich die Evapotranspiration ET [mm] zu berechnen, muss Gleichung 2.18 noch durch die Dichte von Wasser ρ_w (1000 kg m^{-3}) geteilt werden und in dem entsprechenden Zeitintervall Δt [s] aufsummiert werden:

$$ET = \sum_i \frac{E_{q,i}}{\rho_w} \Delta t. \quad (2.19)$$

Oft wird jedoch auch der Energiefluss, welcher durch den Wasserdampffluss entsteht, betrachtet. Dieser sogenannte latente Wärmefluss LE [W m^{-2}] wird durch Multiplikation von E_q aus Gleichung 2.18 mit der latenten Verdunstungswärme L_{ev} [J kg^{-1}] berechnet.

Die Eddy-Kovarianz-Messungen des latenten Wärmeflusses, welche in dieser Dissertation dargestellt sind, (und auch Messungen zu anderen Größen wie z. B. fühlbarem Wärmefluss und N_2O -Transport) wurden von Rolf Schilling und Christoph Thieme durchgeführt und unter Zuhilfenahme des Software-Paketes *TK3* (Mauder und Foken 2015) ausgewertet.

2.8 Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung

Am 22. Juli 2015 wurden die vier Pflanzen, in denen Saftfluss gemessen wurde, detailliert und nicht destruktiv vermessen. Die relevanten Größen konnten dann als Eingabeparameter für Simulationen (siehe Abschnitt 4.3) genutzt werden. Im Einzelnen wurden folgende Größen bestimmt: Positionen am Stängel, Länge, maximale Breite und Dicke der einzelnen Blätter und Kolben, die minimalen und maximalen Stängeldurchmesser in bestimmten Höhen, sowie die Gesamthöhe der Pflanzen. Am 26. August 2015 wurden zusätzlich weitere, vergleichbare Pflanzen geerntet und entsprechend vermessen.

Nach Beendigung der Saftflussmessungen am 2. Oktober 2015 wurden die Pflanzen, in denen Saftfluss gemessen wurde, ebenfalls geerntet. Um die Blattflächenverteilung der Pflanzen bzw. den Blattflächenindex (LAI) [$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$] möglichst genau, auch in Abhängigkeit der Höhe, zu bestimmen, wurden die einzelnen Blätter auf Papier aufgeklebt und nummeriert. Eine Schwierigkeit stellte jedoch die Festigkeit und die brüchige Beschaffenheit der Blätter dar. Die einzelnen Papiere wurden dann eingescannt (siehe Abbildung 2.10) und per Bilderkennung ausgewertet. Diesen letzten Schritt führte Marius Bickel im Rahmen einer Werkstudententätigkeit am Helmholtz Zentrum München aus. Da einzelne Blätter schon teilweise oder ganz welk waren, andere aber noch grün,



Abbildung 2.10: Aufgeklebte Maisblätter, Pflanzenernte am 2. Oktober 2015 in Scheyern

konnte dadurch einerseits der grüne LAI bei Ernte ermittelt werden, aber andererseits auch der maximale LAI als Summe von grünen und welken Teilen der einzelnen Blätter.

Von allen geernteten Pflanzen wurden außerdem – aufgeschlüsselt nach Pflanzenkompartimenten – die Frisch- und Trockenmassen bestimmt.

2.9 Wurzelverteilung

Am 27. Oktober 2015 wurde mithilfe der Profilwandmethode (Böhm 1979) die Wurzelverteilung von Maispflanzen bis zu 50 cm Tiefe im Schlag A17 des Versuchsguts Scheyern bestimmt. Hierfür wurde eine 1 m² große Grube (Abbildung 3.15b) gegraben mit zunächst einer senkrechten Profilwand genau in der Mitte von und parallel zu zwei Maisreihen (40 cm Abstand von der Maisreihe). Unter Zuhilfenahme eines Drucksprühgeräts (*Gloria prima 3*, 3l Fassungsvermögen bei 3 bar Maximaldruck, GLORIA Haus- und Gartengeräte GmbH, Witten, Deutschland) wurden dann 0,5 cm Boden abgewaschen, sodass die Wurzeln besser erkennbar waren und das genaue Bodenvolumen, auf das sich die gemessene Wurzellänge bezieht, bestimmt werden konnte. Auf eine Plexiglasplatte mit einem Raster von 5 cm x 5 cm wurde dann eine Folie gespannt und die Platte direkt an die freigewaschene Profilwand angelegt (Abbildung 3.15c). Darauf konnten dann die Wurzeln mit einem Punkt pro 1 cm Wurzellänge markiert werden. Diese Schritte wurden anschließend noch einmal bei ein Viertel Reihenabstand (20 cm Abstand von der Maisreihe) sowie direkt unterhalb der Maispflanzen wiederholt.

Kapitel 3

Ergebnisse und Diskussion der Messungen

3.1 Wasserbilanz

Abbildung 3.1 zeigt die gemessenen Wetterbedingungen der meteorologischen Messtation in Garching zwischen 14. August (DOY 226, 226. Tag des Jahres) und 11. September (DOY 254) 2013. Diese Periode wurde ausgewählt, da währenddessen ebenfalls Saftfluss in den Maispflanzen auf den Lysimetern 43 und 45 gemessen wurde (siehe Abschnitte 2.4 und 3.3).

An wolkenfreien Tagen erreichte die Solarstrahlung Tagesmaxima von 850 W m^{-2} , an bewölkten Tagen lagen die Tagesmaxima bei etwa 250 W m^{-2} . Die Lufttemperatur zeigte im Allgemeinen einen ähnlichen Verlauf wie die gemessene Solarstrahlung. Die maximalen Tagestemperaturen lagen bei fast $30 \text{ }^\circ\text{C}$, die minimale Temperatur in dieser Periode war $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Die höchsten Tagesmaxima der Temperatur wurden an den Tagen gemessen, an denen die einfallende Solarstrahlung am Höchsten war. Diese Tage waren durch Tagestemperaturamplituden von mehr als $15 \text{ }^\circ\text{C}$ gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu waren an bewölkten Tagen die Temperaturamplituden niedrig. Das Auftreten der Niederschlagsereignisse stand ebenfalls in Einklang mit den Strahlungsmessungen. Der Hauptniederschlag (25 mm d^{-1}) fand am 25. August (DOY 237) statt. Weiterer Niederschlag (bis zu 12 mm d^{-1}) wurde am 19., 24. und 27. August sowie zwischen 8. und 10. September (DOY 231, 236, 239, und 251 - 253) gemessen. Die relative Luftfeuchte war ebenfalls durch tägliche Zyklen charakterisiert. Die niedrigsten Werte von 35 % wurden am Tag erreicht, während in der Nacht die höchsten Werte von 95 % auftraten. An den meisten Regentagen war die relative Luftfeuchte größer als 80 % und schwankte nur wenig. Der Zusammenhang zwischen den Tagesgängen von relativer Luftfeuchte

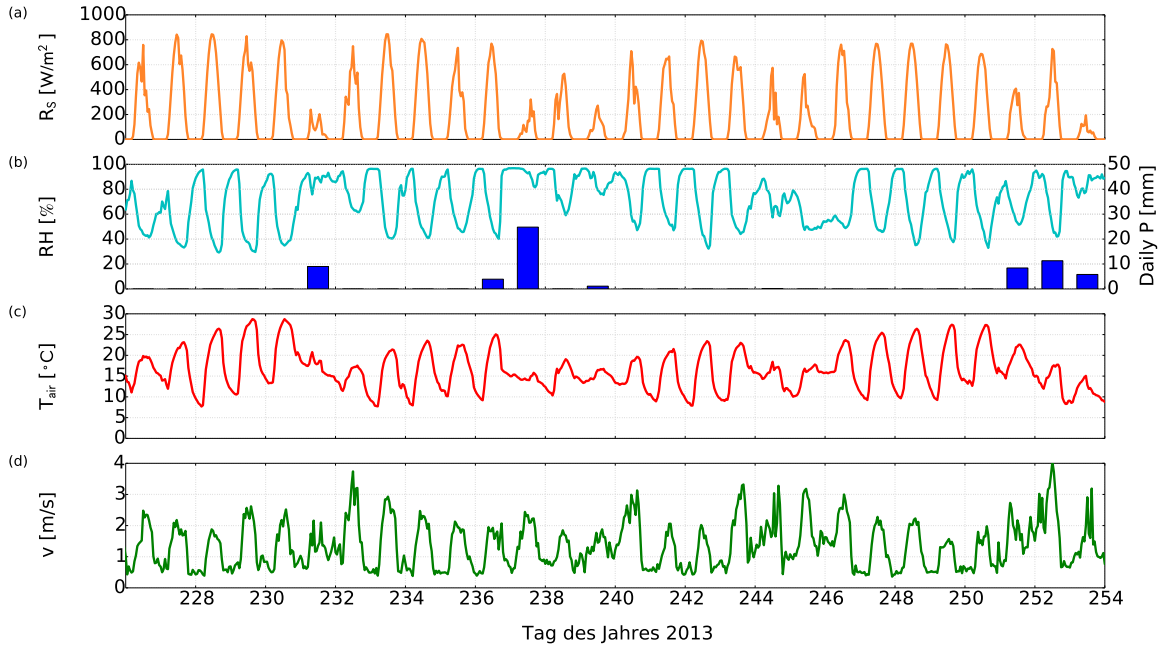


Abbildung 3.1: Zeitreihe der gemessenen Wetterdaten von 14. August bis 11. September 2013 aus Garching (Nähe Lysimeterstation): (a) Globalstrahlung R_s [W m^{-2}], (b) Relative Luftfeuchte RH [%] auf der linken y-Achse und Tagesniederschlag $daily P$ [mm] auf der rechten y-Achse, (c) Lufttemperatur T_{air} [$^{\circ}\text{C}$] und (d) Windgeschwindigkeit v [m s^{-1}] in 2 m Höhe.

und Temperatur (vgl. Kraus 2004a) ist deutlich. Aufgrund von hohen Temperaturen und viel einfallender Solarstrahlung traten während des Tages Turbulenzen auf, was zu Windgeschwindigkeiten von bis zu 4 m s^{-1} führte. An den Nachmittagen nahmen dann Temperaturen und Solarstrahlung ab, und es kam zur Entkopplung der bodennahen, atmosphärischen Grenzschicht vom Rest der Atmosphäre (vgl. Troen und Mahrt 1986). Dieser Prozess verhinderte Turbulenzen, weshalb die gemessenen Windgeschwindigkeiten bis zum nächsten Morgen kleiner als 1 m s^{-1} waren.

Die Massenänderung von Lysimeter und Sickerbehälter zwischen 14. August und 11. September 2013 ist in Abbildung 3.2 dargestellt. In Abbildung 3.2a ist ein positiver Wert gleichbedeutend mit einer Massenzunahme durch Niederschlag und ein negativer Wert spiegelt Wasserverluste durch Evapotranspiration wider. Gut erkennbar, v. a. in den täglichen Massenänderungen, sind die in Abbildung 3.1 beschriebenen Niederschlagsereignisse. Diese manifestieren sich als deutliche Gewichtsanstiege, wobei in diesem Fall alle Lysimeter nahezu identische tägliche Massenänderungen vorweisen. In beiden Teilen der Abbildung wird deutlich, dass die naturbelassenen Lysimeter 41 und 47 mehr

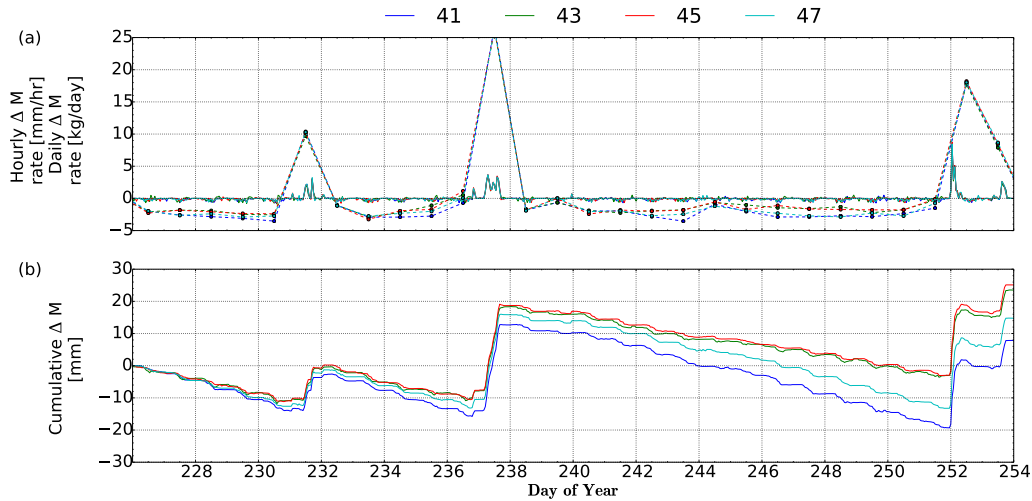


Abbildung 3.2: Zeitreihe der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter von 14. August bis 11. September 2013. Die einzelnen Farben stellen die jeweiligen Lysimeter dar. (a) Stündliche Änderung der Massen [mm h^{-1}] als durchgezogene Linien, und Tagesänderung der Massen [kg d^{-1}] gestrichelt mit großen Punkten. (b) Kumulative Änderung der Massen [mm] ab 14. August 2013.

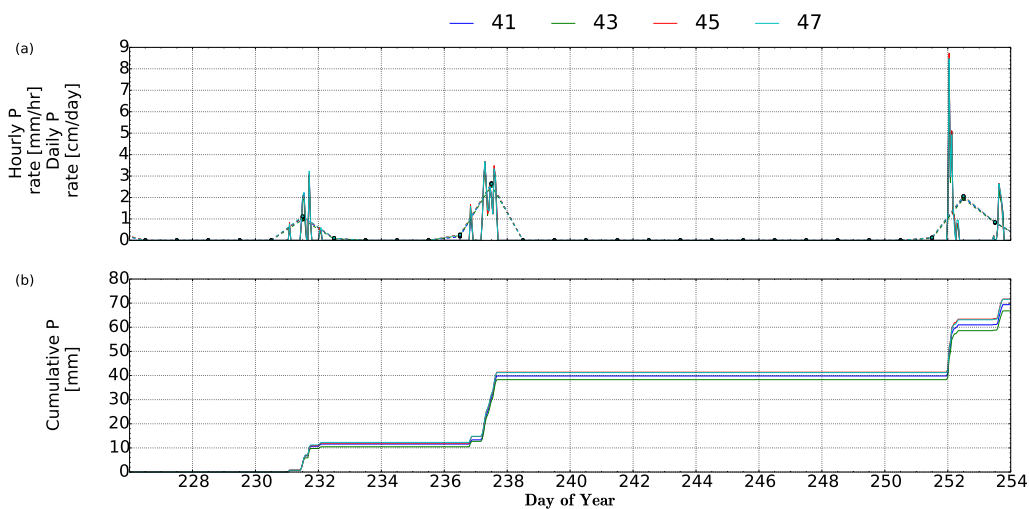


Abbildung 3.3: Zeitreihe des Niederschlags von 14. August bis 11. September 2013, ermittelt aus der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter. Die einzelnen Farben stellen die jeweiligen Lysimeter dar. (a) Stündliche Niederschlagsraten [mm h^{-1}] als durchgezogene Linien, und Tagesniederschläge [cm d^{-1}] gestrichelt mit großen Punkten. (b) Kumulativer Niederschlag [mm] ab 14. August 2013.

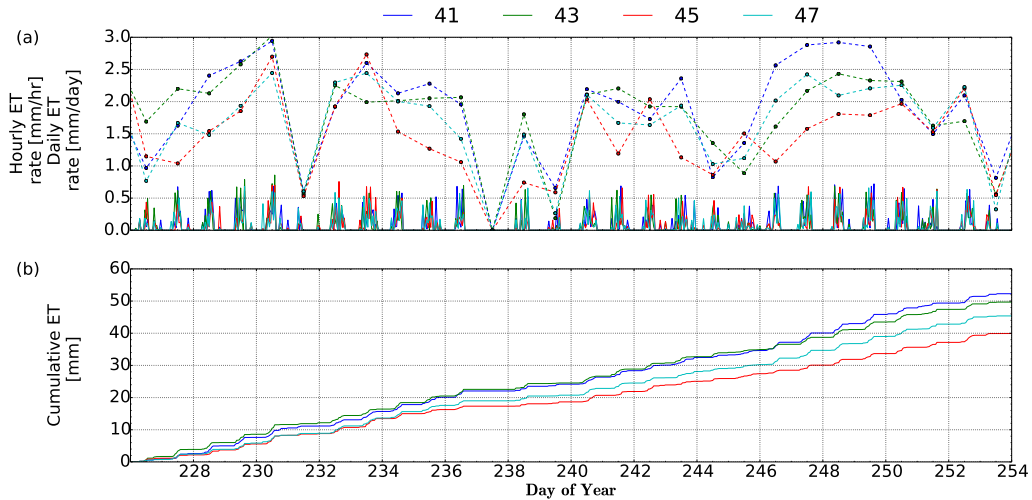


Abbildung 3.4: Zeitreihe der Evapotranspiration von 14. August bis 11. September 2013, ermittelt aus der Massenänderung der Systeme Lysimeter plus Sickerbehälter. Die einzelnen Farben stellen die jeweiligen Lysimeter dar. (a) Stündliche Evapotranspirationsraten [mm h^{-1}] als durchgezogene Linien, und Tagesraten der Evapotranspiration [mm d^{-1}] gestrichelt mit großen Punkten. (b) Kumulative Evapotranspiration [mm] ab 14. August 2013.

Wasser durch Evapotranspiration abgeben als die mit Mais bepflanzten Lysimeter 43 und 45. Diese waren zwar mit einzelnen großen Maispflanzen bewachsen, die restliche Bodenbedeckung durch Pflanzen war aber sehr gering, während Lysimeter 41 und 47 dichten Bewuchs aufwiesen.

In Abbildung 3.3 sind der stündliche [mm h^{-1}], der tägliche [cm d^{-1}] sowie der kumulative [mm] Niederschlag zwischen 14. August (DOY 226) und 11. September (DOY 254) aufgetragen. Am 25. August (DOY 237) wurde die maximale Tagesniederschlagsrate von $2,5 \text{ cm d}^{-1}$ registriert. Die auf diese Weise ermittelten Niederschlagsraten stimmen im Allgemeinen mit denen des Messturms in Garching (Abbildung 3.1) überein. Eine Ausnahme hiervon ist der 27. August (DOY 239) an dem in Garching eine sehr geringe Menge Niederschlag gemessen wurde, aber durch die Lysimeter kein Niederschlag. Insbesondere im Sommer werden Niederschlagsereignisse in Deutschland häufig durch Konvektion ausgelöst. Diese Konvektion ist stark von lokalen Eigenschaften wie z. B. der Landnutzung oder der Orographie bestimmt. Somit bilden sich oftmals kleinräumige Niederschlagszellen, die nur wenige Quadratkilometer groß sind (Keil u. a. 2013).

Von 8. bis 10. September unterscheidet sich außerdem die Verteilung der täglichen Niederschlagssummen auf die einzelnen Tage. So wurden von den Lysimetern an diesen

Tagen Niederschlagsraten von ca. 1, 20 und 8 mm d^{-1} gemessen, während in Garching etwa 9, 11 und 7 mm d^{-1} registriert wurden. Die Niederschlagssummen sind somit sehr ähnlich, nur die Verteilung unterscheidet sich. Dies hängt unter anderem mit dem Zeitpunkt des maximalen stündlichen Niederschlags von etwa $8,5 \text{ mm h}^{-1}$ am 9. September (DOY 252) zusammen. Dieser trat in Garching in der Stunde vor Mitternacht auf, während das entsprechende Ereignis auf der Lysimeteranlage erst kurz nach Mitternacht eintrat. In Abbildung 3.3b wird deutlich, dass es nur geringe Unterschiede zwischen den durch die einzelnen Lysimeter ermittelten Niederschlagssummen gibt. So liegt der kumulative Wassereintrag in die einzelnen Lysimeter bei 67 mm (Lysimeter 43), 70 mm (Lysimeter 41) und 72 mm (Lysimeter 45 und 47).

Stündliche [mm h^{-1}] und tägliche Evapotranspirationsraten [mm d^{-1}] sowie die kumulative Evapotranspiration [mm] von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013 sind in Abbildung 3.4 abgebildet. Die stündlichen Evapotranspirationsraten (Abbildung 3.4a) betragen maximal $0,8 \text{ mm h}^{-1}$ und sind im Allgemeinen innerhalb eines Tages um 12 Uhr herum verteilt. Es treten jedoch größere Unterschiede zwischen den einzelnen Lysimetern auf. Der 25. August (DOY 237) ist der einzige Tag an dem von den Lysimetern keine Evapotranspiration gemessen wurde. Die täglichen Evapotranspirationsraten liegen zwischen 0 mm d^{-1} und ca. $3,0 \text{ mm d}^{-1}$ (18. August, DOY 230). Diese waren v. a. an den Tagen mit Niederschlagsereignissen (z. B. 19. und 25. August sowie 10. September, DOY 231, 237 und 253) besonders niedrig. Ebenfalls fand am 27. August (DOY 239) wenig Evapotranspiration statt (maximal $0,7 \text{ mm d}^{-1}$), obwohl von den Lysimetern kein Niederschlag registriert wurde. Jedoch waren Solarstrahlung (maximal 300 W m^{-2}) und Temperaturamplitude ($4,0 \text{ }^\circ\text{C}$) deutlich niedriger als an anderen Tagen in der analysierten Periode (siehe Abbildung 3.1). Der entgegengesetzte Fall trat am 9. September (DOY 252) ein, an dem viel Niederschlag von den Lysimetern gemessen wurde, aber dennoch zwischen $1,7$ und $2,2 \text{ mm d}^{-1}$ evapotranspiriert wurde. Dies hängt jedoch damit zusammen, dass der meiste Niederschlag vor Tagesanbruch stattfand und während des Tages dann trotzdem hohe Strahlungswerte (bis zu 750 W m^{-2}) gemessen wurden. Zusätzlich begünstigte an diesem Tag die hohe Wasserverfügbarkeit im Boden die Evapotranspiration. Die Zusammenhänge zwischen der gemessenen Evapotranspiration aus Lysimetern und Wetterdaten wie Solarstrahlung, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit sind schon seit langem bekannt (Davenport 1967; Wilcox 1963).

Des Weiteren wird auch innerhalb der Tagesraten die unterschiedliche Evapotranspiration der einzelnen Lysimeter deutlich. Es lässt sich jedoch keine generelle Aussage

treffen, dass ein bestimmtes Lysimeter an jedem Tag mehr Wasser an die Atmosphäre abgibt. Der größte Unterschied zwischen den täglichen Evapotranspirationsraten der verschiedenen Lysimeter betrug etwa $1,5 \text{ mm d}^{-1}$ und trat am 3. September (DOY 246) auf. Unterschiedliche Evapotranspirationsraten aus mit gleichem Boden befüllten Lysimetern wurden auch von Wegehenkel und Gerke (2013) gemessen.

Die kumulativen Evapotranspirationsraten (Abbildung 3.4b) zeigen große Ähnlichkeiten zwischen Lysimeter 41 und 43 bis zum 3. September (DOY 246). Ab dann wurde mehr Evapotranspiration von Lysimeter 41 gemessen. Ebenfalls unterscheidet sich die kumulative Evapotranspiration zwischen Lysimeter 45 und 47 bis 22. August (DOY 234) wenig, jedoch wurde dann aus dem naturbelassenen Lysimeter 47 mehr Wasser an die Atmosphäre abgegeben. Im ganzen Zeitraum lag die aufsummierte Evapotranspiration zwischen 40 mm (Lysimeter 45) und 52 mm (Lysimeter 41).

3.2 Bodenfeuchtemessungen

Die Wassergehalte in 50 cm und 80 cm Tiefe, welche im Jahr 2013 im Lysimeter 45 der Lysimeteranlage Neuherberg gemessen wurden, sind in Abbildung 3.5 dargestellt. In 50 cm Tiefe (Abbildung 3.5a) schwanken die Wassergehalte zwischen $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (24. August, DOY 236) und $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (1. Juni, DOY 152). In dieser Tiefe sind die meisten Niederschlagsereignisse deutlich durch einen Anstieg der Bodenfeuchte zu erkennen. Danach nimmt der Wassergehalt zunächst rapide und im weiteren Verlauf immer langsamer ab. Nach der Aussaat der Maispflanzen (24. Mai, DOY 144) nehmen die gemessenen Wassergehalte schneller ab im Vergleich zu den Zeiten in denen keine Pflanzen auf dem Lysimeter vorhanden sind. Zwischen Anfang Juli (ab DOY 182) und 24. August (DOY 236) sinkt der Bodenwassergehalt stetig, da zum einen in dieser Zeit kaum Niederschlag fiel, und zum anderen viel Bodenwasser von den Maispflanzen aufgenommen wurde oder aus den weiter oben liegenden Bodenschichten das Wasser evaporierte. Während in den Pflanzen Saftfluss gemessen wurde (14. August bis 11. September, DOY 226 bis 254) stieg der Wassergehalt in 50 cm Tiefe einmal um ca. $0,085 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (25. August, DOY 237) und ein anderes Mal um ca. $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (10. September, DOY 253) an. Die schwächeren Regenereignisse (19. und 27. August, DOY 231 und 239, vgl. Abbildung 3.1) haben keinen erkennbaren Einfluss auf die hier gemessenen Wassergehalte. Die stärksten Anstiege des Bodenwassers in 50 cm Tiefe fanden am 25. August (DOY 237) und 10. Oktober (DOY 283, fast $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) statt.

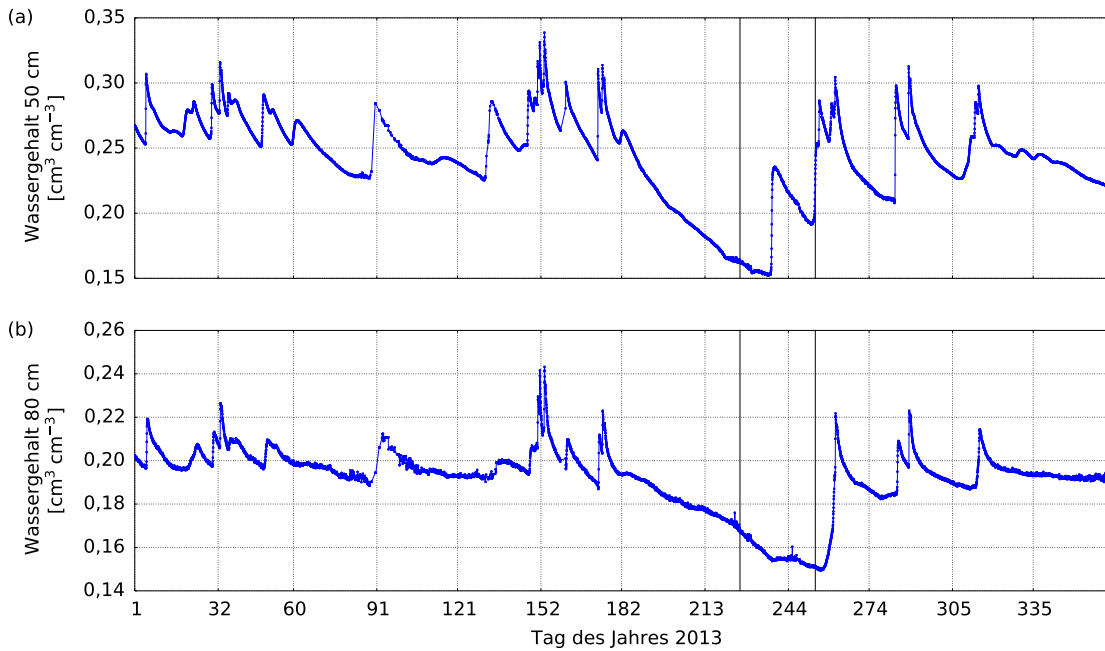


Abbildung 3.5: Stündlich gemessene Bodenwassergehalte [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] in (a) 50 cm und (b) 80 cm Tiefe im Lysimeter 45 der Lysimeteranlage Neuherberg im Jahr 2013. Die Beschriftung der x-Achse zeigt jeweils den ersten Tag eines Monats, die vertikalen, schwarzen Linien kennzeichnen den Zeitraum der Saftflussmessung von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013.

Die Schwankung des Bodenwassergehaltes ist in 80 cm Tiefe (Abbildung 3.5b) deutlich schwächer ausgeprägt. Die Wassergehalte liegen minimal bei $0,15 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (10. September, DOY 253), maximal bei etwas über $0,24 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (1. Juni, DOY 152), genau wie in 50 cm Tiefe. Bei der Bodentiefe von 80 cm ist der Anstieg des Wassergehaltes durch Niederschlag deutlich geringer ausgeprägt, auch spiegeln sich manche Niederschlagsereignisse in dieser Tiefe gar nicht in der Änderung des Bodenwassergehaltes wider. Insbesondere sinkt der Wassergehalt zwischen Anfang Juli und Mitte September nahezu stetig, d. h. auch während der Saftfluss der Maispflanzen gemessen wurde. Erst Mitte September steigt der Bodenwassergehalt innerhalb mehrerer Tage deutlich von ca. $0,15$ auf $0,22 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ an, was auch gleichzeitig den stärksten Anstieg des Bodenwassergehaltes in dieser Tiefe markiert. Neben den schwächer ausgeprägten Anstiegen des Wassergehaltes, sinkt dieser auch deutlich langsamer als in 50 cm Tiefe. Dies liegt u. a. an den allgemein niedrigeren Wassergehalten, die näher am residualen Wassergehalt liegen, wodurch allzu schneller Wasserverlust verhindert wird (vgl. Bodenwasserspannungskur-

Tabelle 3.1: Minimum und Maximum der Dreistundenmittel der gemessenen Bodenwassergehalte θ auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Zeitraum zwischen 15. Juli (DOY 196) und 15. September (DOY 258) 2015, unter Berücksichtigung unterschiedlichen Messtiefen und Messgeräte

Tiefe [cm]	Messgerät	Datum _{min} [-]	θ_{min} [cm ³ cm ⁻³]	Datum _{max} [-]	θ_{max} [cm ³ cm ⁻³]
10	1	14.8. (DOY 226)	0,104	15.7. (DOY 196)	0,212
	2	7.8. (DOY 219)	0,048	25.8. (DOY 237)	0,220
	3	14.8. (DOY 226)	0,068	15.7. (DOY 196)	0,213
30	1	14.8. (DOY 226)	0,063	15.7. (DOY 196)	0,137
	2	15.8. (DOY 227)	0,084	24.8. (DOY 236)	0,203
	3	13.8. (DOY 225)	0,066	15.7. (DOY 196)	0,195
50	1	15.8. (DOY 227)	0,177	25.7. (DOY 206)	0,277
	2	15.8. (DOY 227)	0,143	15.7. (DOY 196)	0,296
	3	14.8. (DOY 226)	0,170	25.7. (DOY 206)	0,315

ve von Van Genuchten 1980) und daran, dass mit zunehmender Tiefe im Allgemeinen die Wurzelanzahl, und somit die Wasseraufnahme durch die Pflanzen, geringer wird.

Abbildung 3.6 zeigt stündliche und dreistündliche Mittel der von 15. Juli bis 15. September in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe gemessenen Wassergehalte auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern. Die stündlichen Mittelwerte schwankten stark, während in den dreistündlichen Mittelwerten größtenteils Tagesgänge zu erkennen sind. Der maximal gemessene Wassergehalt an den jeweiligen Tagen trat meistens nachts, etwa zwischen 22 und 6 Uhr auf, der minimale, gemessene Wassergehalt nachmittags. In 10 cm Tiefe schwankten die Wassergehalte zwischen 0,05 cm³ cm⁻³ und 0,22 cm³ cm⁻³, in 30 cm Tiefe zwischen 0,07 und 0,2 cm³ cm⁻³, und in 50 cm Tiefe zwischen 0,15 cm³ cm⁻³ und 0,31 cm³ cm⁻³. Die Minima und Maxima der Dreistundenmittel der Wassergehalte im entsprechenden Messzeitraum, aufgeschlüsselt nach Messtiefe und Messgerät, sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Mit Ausnahme von Messgerät 2 in 10 cm Tiefe (7. August, DOY 219), das gleichzeitig den geringsten gemessene Wassergehalt in der Messperiode zeigte, wurde der minimale Wassergehalt zwischen 13. und 15. August (DOY 225 - 227) gemessen. Die maximalen Wassergehalte liegen bei Beginn des Messzeitraums, sofern während des Messverlaufs keine größere Wasserzufuhr registriert wurde. Traten jedoch starke, sprunghafte Anstiege des Wassergehaltes auf, liegen die Maxima dann an den entsprechenden Tagen, z. B. am 25. und 24. August (DOY 237 und 236, Messgerät 2, in 10 cm und 30 cm Tiefe) oder am 25. Juli (DOY 206, Messgerät 1 und 3, in 50 cm Tiefe).

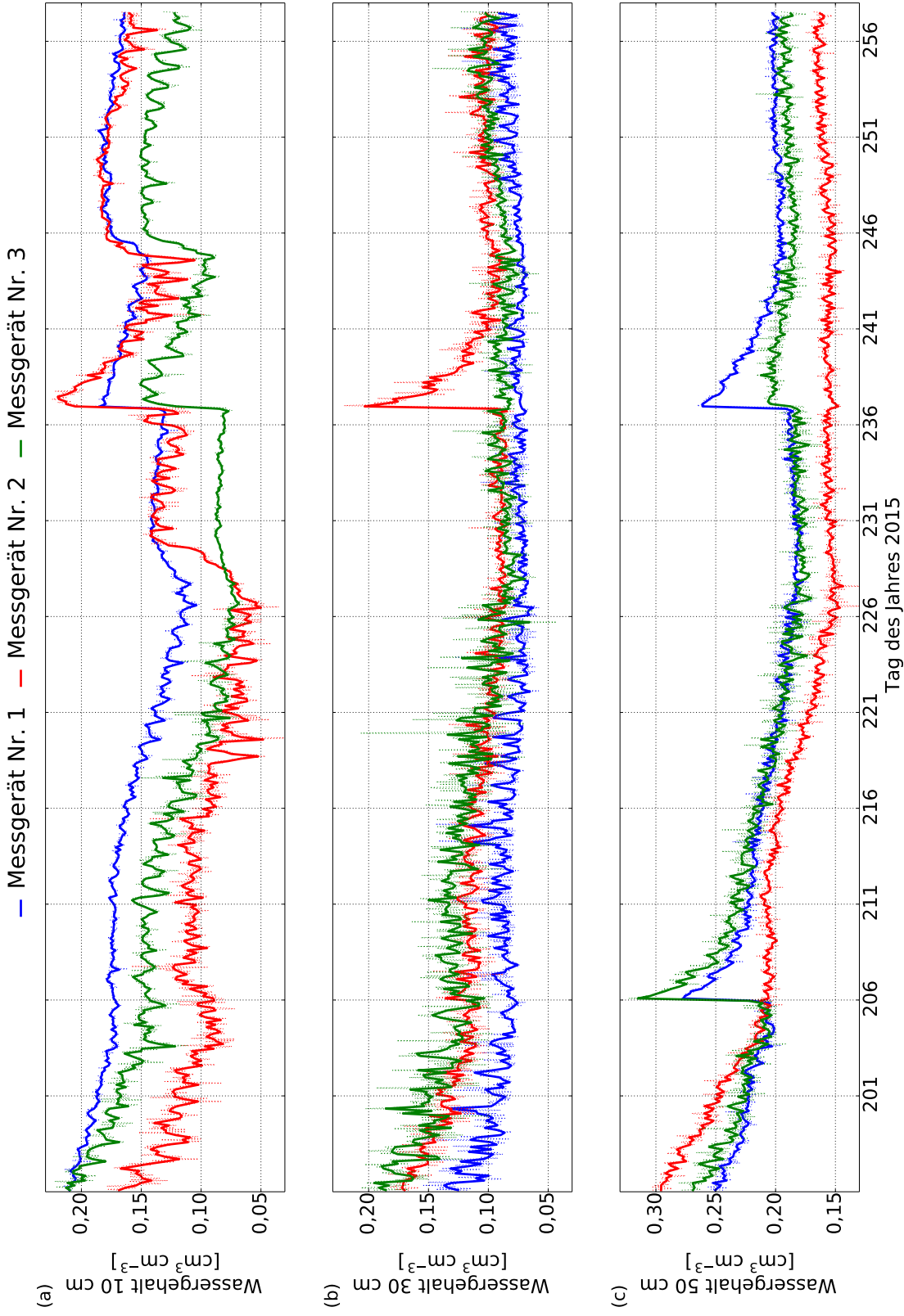


Abbildung 3.6: Bodenwassergehalte [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern in (a) 10 cm, (b) 30 cm und (c) 50 cm Tiefe von 15. Juli (DOY 196) bis 15. September (DOY 258) 2015. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen unterschiedliche Messgeräte. Die gepunkteten Linien sind stündliche Mittel, die durchgezogenen, dicken Linien dreistündliche Mittel der zehnmütlich gemessenen Werte.

Auffällig ist, dass sich die Dynamiken der Wassergehalte, die in der selben Tiefe, aber von unterschiedlichen Messgeräten gemessen wurden, teils deutlich unterscheiden. Beispiele hierfür sind z. B. in 10 cm Tiefe der deutliche Anstieg des von Messgerät 2 gemessenen Wassergehaltes von etwa $0,05$ auf $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ zwischen 14. und 19. August (DOY 226 - 231) während die Wassergehalte der anderen Messgeräte nur sehr wenig ansteigen, in 30 cm Tiefe der von Messgerät 2 gemessene Peak am 24. August (DOY 236), den die anderen zwei Messgeräte gar nicht abbilden, oder in 50 cm Tiefe das Fehlen der sprunghaften Anstiege in der Dynamik des Wassergehaltes von Messgerät 2 am 25. Juli und 24. August (DOY 206 und 236) im Vergleich zu Messgerät 1 und 3. Analog dazu ist ebenfalls die Dynamik der Wassergehalte eines Messgerätes in den verschiedenen Tiefen nicht immer einheitlich. So wurde von Messgerät 1 und 3 der Peak am 25. Juli (DOY 206) in 50 cm Tiefe registriert, aber nicht in den oberen Bodenschichten. Auch am 24. August (DOY 236) tritt der in 10 cm Tiefe gemessene sprunghafte Anstieg in den Messreihen aller Messgeräte auf, jedoch nur teilweise in 30 cm Tiefe (nur Messgerät 2) und in 50 cm Tiefe (Messgerät 1 und 3). Dieses Verhalten könnte u. a. durch präferentielle Fließbahnen (Dekker und Ritsema 1996; Flury u. a. 1994; Mossadeghi-Björklund u. a. 2016; Weiler 2016) verursacht worden sein, sodass das Regenwasser nicht gleichmäßig in den Boden einsickerte und im Boden nicht nur vertikal sondern auch horizontal floss. Dies würde z. B. ermöglichen, dass bei senkrecht übereinander angeordneten Messapparaturen Wassereintrag nicht in jeder Tiefe registriert wird oder dass nicht in jeder Bodentiefe alle Messgeräte den gleichen Anstieg des Wassergehaltes messen. So fanden z. B. Dekker und Ritsema (1996) präferentiellen Fluss in Makroporen, aber auch in Mikroporen. Ersterer trat besonders dann auf, wenn der Boden ausgetrocknet war und durch Schrumpfen verursachte Risse hatte. Diese waren im vergleichsweise trockenen Sommer 2015 auf dem Schlag A17 vorhanden.

3.3 Saftflussmessung

Abbildung 3.7 zeigt stündliche Mittel der gemessenen Saftflussraten von fünf Pflanzen auf Lysimeter 45 im Zeitraum 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013. Der Saftfluss in den einzelnen Pflanzen unterscheidet sich in den Werten, die Dynamik des Saftflusses der Pflanzen ist jedoch ähnlich.

Klar erkennbare Tagesgänge mit hohen maximalen Saftflussraten wurden in den folgenden Zeiträumen gemessen: bis 18. August (DOY 230), von 20. bis 24. August (DOY 232 - 236), am 26. August (DOY 238) und ab 28. August (DOY 240) 2013. Diese beob-

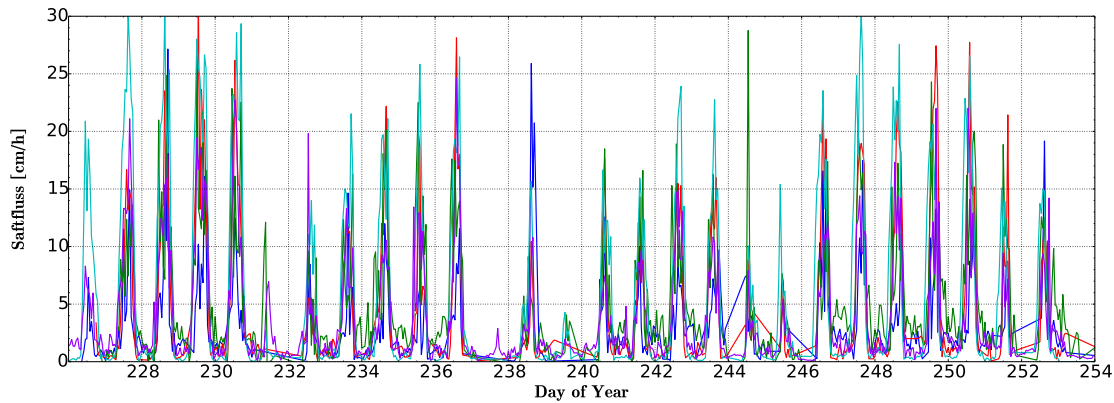


Abbildung 3.7: Stundenmittel der gemessenen Saftflussraten [cm h^{-1}] in fünf verschiedenen Pflanzen (unterschiedliche Farben) auf Lysimeter 45 von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013.

achteten Tagesgänge stehen im Zusammenhang zu den Wetterdaten im entsprechenden Zeitraum: Nettostrahlung, Temperatur und relative Luftfeuchte sind ebenfalls durch deutliche Tagesgänge geprägt. Im Gegensatz dazu waren die maximalen, gemessenen Saftflussraten am 19., 25. und 27. August sowie am 10. September (DOY 231, 237, 239 und 253) niedrig, zumeist unter 5 cm h^{-1} mit Ausnahme von 2 Pflanzen am 19. August. Diese drei Tage waren durch kleine, tägliche Temperaturamplituden, niedrige maximale Nettostrahlung und hohe relative Feuchte charakterisiert. Außerdem wurde an diesen Tagen Regen gemessen.

Jedoch trat manchmal auch trotz gemessenen Regens Saftfluss auf. Beispielsweise am 24. August (DOY 236) sowie am 8. und 9. September (DOY 251 und 252) lagen die Tagesmaxima der Saftflussraten bei 27 cm h^{-1} , 22 cm h^{-1} und 19 cm h^{-1} . Demnach wird der Saftfluss stark von Temperatur, Strahlung und relativer Luftfeuchte beeinflusst. Ebenfalls spielt aber der Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses eine Rolle. So setzte zum Beispiel am 24. August der Regen erst abends ein, weshalb tagsüber trotzdem hohe Saftflussraten gemessen wurden.

Der Zusammenhang zwischen gemessenem Saftfluss und gemessener Evapotranspiration (Abbildung 3.4) ist ebenfalls ersichtlich. An den Regentagen 19., 25. und 27. August (DOY 231, 237 und 239) sind Saftfluss und Evapotranspiration niedrig, während z. B. von 16. - 18. August (DOY 228 - 230) hohe Saftfluss- und Evapotranspirationsraten gemessen wurden. Die berechneten Tagessummen der Transpiration (hier nicht gezeigt), die aus den Saftflussraten bestimmt werden konnten, liegen je nach Tag bei 30 % bis 60 % der gemessenen, täglichen Lysimeter-Evapotranspiration.

Die maximalen stündlichen Mittelwerte der Saftflussraten der einzelnen Pflanzen lagen zwischen $24,6 \text{ cm h}^{-1}$ und $31,2 \text{ cm h}^{-1}$. An einzelnen Tagen, z. B. am 7. September (DOY 250), unterschieden sich die Saftflussraten der verschiedenen Pflanzen kaum. So lagen an diesem Tag die maximalen Saftflussraten zwischen 20 cm h^{-1} und $27,5 \text{ cm h}^{-1}$. Die größten Unterschiede in den maximalen Saftflussraten wurden am 14. und 15. August (DOY 226 und 227) gemessen. Hier erreichten manche Pflanzen nur Saftflussraten von $3,3 \text{ cm h}^{-1}$ bzw. $12,5 \text{ cm h}^{-1}$ während in einer anderen Pflanze Raten von 21 cm h^{-1} bzw. 30 cm h^{-1} gemessen wurden. Mögliche Gründe für die unterschiedlichen Saftflussraten der einzelnen Pflanzen sind unter anderem verschiedene Stängeldurchmesser bzw. Xylemflächen, unterschiedliche Blattflächen (Cohen und Li 1996) und Durchwurzelungstiefen/-dichten (Wurzellängendichten), unterschiedliche Belichtung durch Solarstrahlung und horizontale Unterschiede des Bodenwassergehaltes. Auch nachts wurde geringer Saftfluss gemessen. Selten war dieser höher als 5 cm h^{-1} , meistens wurden Werte zwischen 1 cm h^{-1} und 2 cm h^{-1} gemessen.

In den Abbildungen 3.8 und 3.9 sind Wetterdaten sowie Saftflussmessungen von vier Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern zwischen 15. Juli (DOY 196) und 1. Oktober (DOY 274) 2015 dargestellt. Im Juli und August wurden an wolkenfreien Tagen Maximalwerte der Solarstrahlung (Abbildung 3.8a) von über 900 W m^{-2} gemessen. Meistens lagen die Tagesmaxima jedoch bei ca. 800 W m^{-2} . Gegen Ende des Monats ist eine leicht abnehmende Tendenz zu beobachten. Anfang September werden noch Strahlungswerte von bis zu 780 W m^{-2} erreicht, während gegen Endes des Monats 600 W m^{-2} kaum überschritten werden.

An drei Tagen (22. Juli, 7. und 8. August, DOY 203, 219 und 220) wurden höhere Temperaturen (Abbildung 3.8 c) als $35 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Ansonsten lagen die Tagesmaxima der Temperaturen zwischen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ im Juli, zwischen $16 \text{ }^\circ\text{C}$ und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ im August, und zwischen $13 \text{ }^\circ\text{C}$ und $32 \text{ }^\circ\text{C}$ im September. Die Tagesminimaltemperaturen schwankten zwischen $8 \text{ }^\circ\text{C}$ und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ im Juli, zwischen $8 \text{ }^\circ\text{C}$ und $22 \text{ }^\circ\text{C}$ im August, und zwischen $3 \text{ }^\circ\text{C}$ und $14 \text{ }^\circ\text{C}$ im September.

An Regentagen mit hoher relativer Luftfeuchte, z. B. 17. August und 2. September (DOY 229 und 245) lag die maximale Solarstrahlung bei knapp unter 200 W m^{-2} . An diesen Tagen wurden auch die geringsten täglichen Temperaturamplituden von ca. $3 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Hohe Temperaturamplituden standen grundsätzlich im Zusammenhang mit hohen täglichen Strahlungsmaxima. Im Juli und im August wurden teilweise Temperaturamplituden von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und darüber registriert, im September wurden Temperaturamplituden von $18 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten. Höhere Temperaturen hingen im Allgemeinen

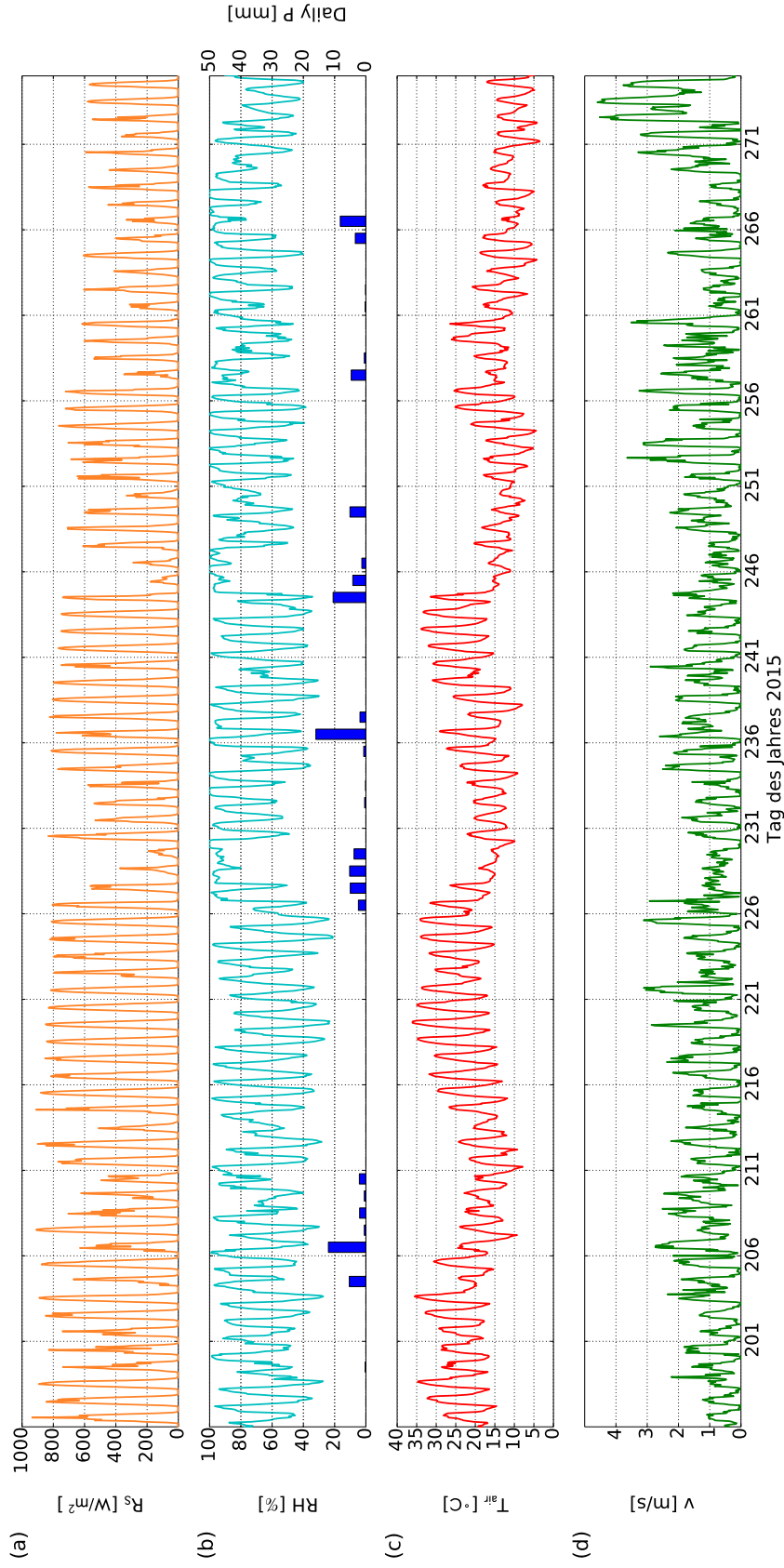


Abbildung 3.8: Zeitreihe der gemessenen Wetterdaten auf der Forschungsplattform Scheuern von 15. Juli (DOY 196) bis einschließlich 1. Oktober (DOY 274) 2015: (a) Globalstrahlung R_s [W m^{-2}], (b) Relative Luftfeuchte RH [%] auf der linken y-Achse und Tagesniederschlag *daily P* [mm] auf der rechten y-Achse, (c) Lufttemperatur T_{air} [$^{\circ}\text{C}$] und (d) Windgeschwindigkeit v [m s^{-1}] in 2 m Höhe.

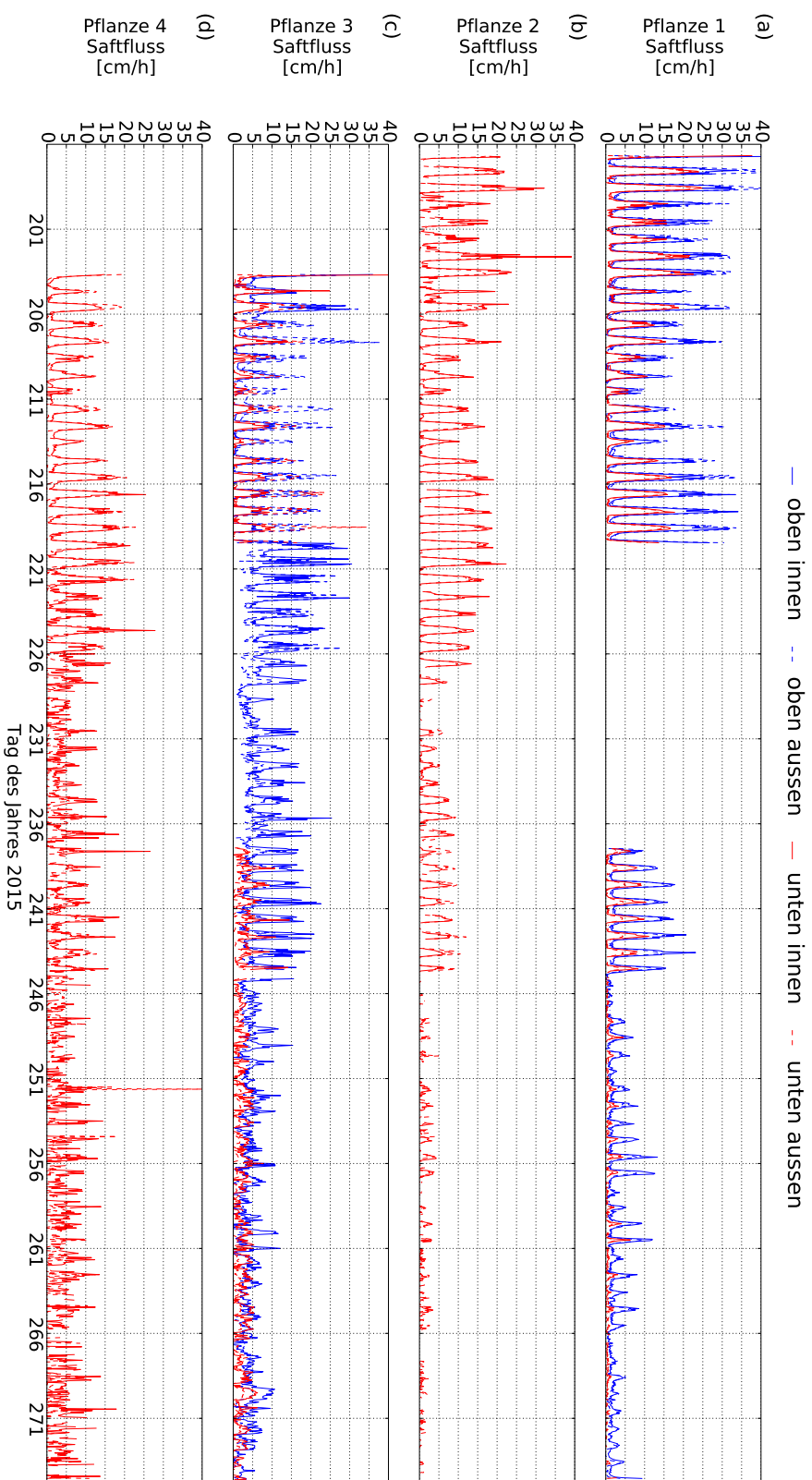


Abbildung 3.9: Zeitreihe des Saftflusses [cm h^{-1}] in 4 verschiedenen Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli (DOY 196) bis einschließlich 1. Oktober (DOY 274) 2015. In Pflanze 1 (a) und 3 (c) fanden Messungen an zwei vertikalen Positionen statt: oberhalb (blaue Linie) und unterhalb (rote Linie) der untersten zwei Blätter. In Pflanze 2 (b) und 4 (d) wurde nur direkt oberhalb der Bodenoberfläche gemessen. Die zwei verschiedenen horizontalen Messpunkte je Messposition sind mit innen (durchgezogene Linie) und aussen (gestrichelte Linie) gekennzeichnet.

mit hohen Strahlungswerten zusammen (vgl. Bristow und Campbell 1984). Am 18. August (DOY 230) hingegen erreichte die Temperatur nur etwa 22°C , wobei die Tageshöchststrahlung bei 850 W m^{-2} lag. Diesem Tag vorangegangen sind allerdings vier Regentage, welche eine starke Abkühlung bewirkt hatten (Dai u. a. 1999).

An 27 der insgesamt 80 Tage des Messzeitraums wurde Niederschlag (Abbildung 3.8 b) gemessen, zumeist an mehreren aufeinander folgenden Tagen, zum Beispiel von 25. - 29. Juli und von 14. bis 17. August (DOY 206 - 210 und 226 - 229). Die tägliche Niederschlagssumme betrug meistens nur wenige Millimeter, am 24. August (DOY 236) wurden jedoch $15,5\text{ mm}$ Niederschlag registriert. Dies stellt die maximale Tagesniederschlagssumme in der untersuchten Periode dar.

Die relative Luftfeuchte (Abbildung 3.8b) war durch deutliche Tagesgänge charakterisiert und schwankte zwischen 20% (12. August, DOY 224) und 100% (insgesamt 10 Tage zwischen 3. und 25. September, DOY 246 und 268). Die täglichen Maximalwerte der relativen Feuchte traten grundsätzlich nachts auf und lagen im ganzen Messzeitraum über 70% . Die täglichen Minima der relativen Luftfeuchte wurden an den Nachmittagen gemessen. Während an wolkenfreien Strahlungstagen diese Werte bei 50% und darunter lagen, lagen die Tagesminima der relativen Feuchte an einigen Regentagen bei 75% und darüber. Als Beispiele hierfür sind der 16., 17. August sowie der 2., 3. 14. und 23. September (DOY 228, 229, 245, 246, 257 und 266) zu nennen. Augenscheinlich sind auch hier (vgl. 3.1) Zusammenhänge zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur sowie Solarstrahlung (vgl. Bristow und Campbell 1984; Kraus 2004a) erkennbar: an Tagen mit hohen Strahlungswerten und hoher Temperatur ist die relative Luftfeuchte – insbesondere tagsüber – niedriger als an Tagen mit niedrigen Temperaturen und weniger einfallender Solarstrahlung. Besonders deutlich wird dieses Verhalten ab Anfang September: die relative Luftfeuchte tendiert zu höheren Werten, während Temperatur und Strahlung abnehmen.

Auch in der Windgeschwindigkeit (Abbildung 3.8 d) werden Tagesgänge deutlich, jedoch sind hier die kurzzeitigen Schwankungen höher als in den anderen beschriebenen Variablen. Tagsüber sind u. a. aufgrund von Turbulenzen die Windgeschwindigkeiten höher als nachts (Troen und Mahrt 1986). Die gemessenen Tagesmaxima liegen hier meistens zwischen 1 und $3,5\text{ m s}^{-1}$. Die Tagesminima der Windgeschwindigkeit sind selten höher als $0,5\text{ m s}^{-1}$, oft ist auch überhaupt kein Wind messbar. Eine Ausnahme stellen die letzten Tage der Messperiode, 29. September bis 1. Oktober (DOY 272 - 274) dar: tagsüber erreichten die Windgeschwindigkeiten bis zu $4,6\text{ m s}^{-1}$, in den Nächten zwischen diesen Tagen wurden auch Geschwindigkeiten von etwa 2 m s^{-1} gemessen.

Die Zeitreihen in Abbildung 3.9a-d bestehen aus den zwölf Messkurven der sechs installierten Saftflusssensoren. Acht dieser Messreihen stammen von knapp oberhalb der Bodenoberfläche angebrachten Sensoren und vier weitere Messreihen (Pflanze 1 und 3) sind durch Messungen in zwei Pflanzen oberhalb der untersten zwei Blätter entstanden. Jeder Sensor misst zusätzlich zwei Werte, einen inneren und einen äußeren Messwert, die sich um einen Faktor 2 unterscheiden können, oft aber auch sehr ähnlich sind. Bei den Messreihen der Pflanzen 3 und 4 liegen Datenlücken bis 22. Juli (DOY 203) 2015 vor, außerdem fehlen die untere Messreihe von Pflanze 3 und beide Messreihen von Pflanze 1 zwischen 7. und 25. August (DOY 219 - 237). Je nach Pflanze sind die Tagesgänge unterschiedlich ausgeprägt. In Pflanze 1 wurde bis zum Ende der Messreihe ein klar erkennbarer täglicher Verlauf gemessen, in Pflanze 2 nur bis etwa 1. September (DOY 244). Bis zu diesem Zeitpunkt sind auch die Tagesgänge des Saftflusses von Pflanze 3 und 4 noch einigermaßen deutlich, wobei die Schwankungen der Saftflussraten dieser Pflanzen schon ab 14. August (DOY 226) größer werden.

Der maximale Saftfluss der oberen Messreihen von Pflanze 1 (Abbildung 3.9a) lag in den ersten 24 Tagen bei bis zu 40 cm h^{-1} , an der Hälfte dieser Tage hat die äußere Messreihe Werte von über 30 cm h^{-1} . Die unteren Messreihen überschreiten bis auf am ersten Messtag 25 cm h^{-1} nicht. Ab 25. August (DOY 237) lag der weiter unten gemessene Saftfluss maximal bei $11,5 \text{ cm h}^{-1}$, ab 2. September (DOY 245) fast immer unter 5 cm h^{-1} . Die oberhalb gemessenen Saftflussgeschwindigkeiten hingegen überschritten Ende August noch 20 cm h^{-1} , im September wurden des Öfteren Tagesmaxima von mehr als 5 cm h^{-1} gemessen.

Die täglichen Maxima der Saftflussgeschwindigkeiten von Pflanze 2 (Abbildung 3.9b) lagen (außer am 29. Juli, DOY 210) bis 14. August (DOY 226) über 10 cm h^{-1} , an 8 dieser 30 Tage über 20 cm h^{-1} . Die Unterschiede zwischen innerer und äußerer Messung waren meist sehr gering. Ab 15. August (DOY 227) nimmt der Saftfluss deutlich ab. Bis 1. September (DOY 244) wurden maximale Saftflussraten von ca. 10 cm h^{-1} gemessen, danach lag der Saftfluss bei 5 cm h^{-1} oder niedriger. Jedoch waren besonders im September die Messerte sehr stark schwankend und wurden deshalb herausgefiltert.

Pflanze 3 zeigt ein ähnliches Bild wie Pflanze 1. Auch hier waren die Saftflussgeschwindigkeiten der oberen Messungen zumeist höher als die der unteren Messungen. Besonders deutlich ist das zwischen 25. August und 1. September (DOY 237 und 244) in den Messkurven zu sehen (Abbildung 3.9c). So lag der maximale Saftfluss der oberen Messungen z. B. am 28. August (DOY 240) bei 23 cm h^{-1} , jener der unteren Messungen bei 8 cm h^{-1} . Bis 31. August (DOY 243) wurde an manchen Tagen Saftfluss von

über 20 cm h^{-1} registriert. Auch hier wurden – wie bei Pflanze 2 – im September die Schwankungen der Messwerte deutlich größer, weshalb in den Messreihen weniger starke Tagesgänge erkennbar sind. An 9 Tagen im September überschritten die oberen Saftflussmessungen 10 cm h^{-1} .

Die äußeren Saftflussmessungen von Pflanze 4 (Abbildung 3.9d) waren an 9 Tagen größer als 20 cm h^{-1} . Bis 13. August (DOY 225) war außerdem der nächtliche Saftfluss der äußeren Messung niedriger als der innere, d. h. die Tagesamplituden unterschieden sich um bis zu 6 cm h^{-1} . Ab 14. August (DOY 226) schwankten die Messungen deutlicher, was sich ab 2. September (DOY 245) weiter verstärkte. Auch im September wurden vereinzelt noch Saftflussgeschwindigkeiten von über 15 cm h^{-1} gemessen.

Auch nachts wurde in allen Pflanzen ein geringer Saftfluss von etwa 2 cm h^{-1} gemessen. Eine Ausnahme ist Pflanze 3, welche zwischen 8. August und 1. September (DOY 220 und 244) nächtliche Minima des Saftflusses von ca. 5 cm h^{-1} vorweist.

Die erhöhten Saftflussgeschwindigkeiten der oberen Messungen hängen unter anderem mit dem Querschnitt der Pflanzenstängel zusammen (siehe Abschnitt 3.7). Da dieser mit zunehmender Höhe abnimmt, muss sich die Geschwindigkeit des transportierten, inkompressiblen Fluids aufgrund des Kontinuitätsgesetzes entsprechend proportional erhöhen, also der Volumenstrom konstant bleiben (vgl. Modellannahmen von Bohrer u. a. 2005; Kargol 1996). Ist im Stängel jedoch eine Senke vorhanden, zum Beispiel aufgrund eines Blattes oder mehrerer Blätter, so ist der Volumenstrom nicht mehr konstant. Gegen Anfang der Messperiode waren die untersten Blätter der Pflanzen 1 und 3 noch teilweise grün, d. h. durch sie wurde Saft aus dem Stängel entnommen. Ab ca. Mitte August hingegen waren die untersten Blätter komplett verdorrt, weshalb dann (nahezu) der komplette Saft weiter nach oben transportiert wurde.

Auch in den hier vorgestellten Messreihen der Forschungsplattform Scheyern ist ein deutlicher Zusammenhang zu den gemessenen Wetterdaten zu erkennen. So sind die Saftflussraten vor allem an Tagen mit Niederschlag, hoher Luftfeuchte (größer als 80 %), vergleichsweise niedriger maximaler Strahlung (600 W m^{-2} und weniger) und geringen Temperaturamplituden (kleiner als 10°C) niedrig. Als Beispiele hierfür sind der 29. Juli, 16. - 18. August und 1. - 2. September (DOY 210, 228 - 230, 245 - 246) zu nennen. Hohe Saftflussgeschwindigkeiten (Tagesmaxima je nach Pflanze größer als 15, 20 bzw. 30 cm h^{-1}) treten auf, wenn das Tagesmaximum der Solarstrahlung hoch (größer als 800 W m^{-2}), die relative Luftfeuchte gering (Tagesminimum kleiner als 50 %) und die Temperaturamplitude (bis zu 20°C) deutlich ausgeprägt sind. Besonders deutlich heben sich hierbei 14. - 16., 20., 21., 23., 25. und 30. Juli, sowie 2. - 14. und 21. - 31. August

(DOY 196-198, 202, 203, 205, 207, 212, 215 - 227, und 234 - 244) hervor. Dennoch unterscheiden sich die Tagesgänge der Saftflussraten insbesondere im August. Auffallend sind hier die hohen Tagesmaxima des Saftflusses am 23. und 31. August (DOY 236 und 244), welche trotz vergleichsweise hohem Niederschlag an diesen Tagen auftreten. Diese Maxima lassen sich jedoch darauf zurückführen, dass die Regenereignisse nachts stattfanden und somit danach sogar mehr Wasser zur Aufnahme durch die Pflanzen zur Verfügung stand. Die leichte Abnahme der Saftflussgeschwindigkeiten zwischen 7. und 14. August (DOY 220 und 227) ist vor allem mit der Austrocknung des Bodens begründet (vgl. Transpirationmessungen von Ray und Sinclair 1998), da zwischen 28. Juli und 13. August (DOY 210 und 226) kein Niederschlag fiel.

Die Zusammenhänge zwischen Saftfluss bzw. Transpiration und verschiedenen Wetterdaten wurden im Rahmen diverser Messkampagnen analysiert. So fanden Jiang u. a. (2016) und Xiao u. a. (2016) Korrelationen zwischen Solarstrahlung und dem gemessenen Saftfluss bei Feldmessungen in den USA und China. Abhängigkeiten der Mais-Transpiration von Temperatur und Sättigungsdefizit wurden u. a. bei Feldstudien in Spanien (Cavero u. a. 2009), und Klimakammer-Experimenten in den Vereinigten Staaten von Amerika (Gholipour u. a. 2012; Yang u. a. 2012) ermittelt.

3.4 Terrestrische Laserscans

Eine zweidimensionale Darstellung der dreidimensionalen Punktwolke eines terrestrischen Laserscans (TLS) ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Aufgenommen wurden die insgesamt vier Scans am 6. September 2013 auf dem Schlag A15 der Forschungsplattform Scheyern. Das Bild zeigt insgesamt vier Maispflanzen sowie vier Reflektorstangen, die weitere aufgenommene Umgebung ist in diesem Bild herausgeschnitten. An den Stangen befinden sich die jeweils drei zylinderförmige Reflektoren, welche als Referenzpunkte dienten, um die einzelnen Bilder zu einem 3D-Bild zusammenzusetzen. Einer der Reflektoren ist u. a. rechts unten im Bild zu erkennen. Des Weiteren fällt auf, dass im oberen Teil der Pflanzen, also bei den Fahnen und den oberen Blättern, die einzelnen Scans leicht voneinander abweichen, d. h. diese Teile der Pflanzen sind im Bild gedoppelt. Gründe hierfür sind unterschiedlich starker Wind während der einzelnen Scanvorgänge, der besonders die oberen Teile der Pflanzen bewegte, sowie die schnelle Austrocknung der Blätter, welche durch die Isolation der Pflanzen an diesem Strahlungstag besonders stark war und die Stabilität der Blätter veränderte (Jeong u. a. 2013). Ebenfalls sind vereinzelte Punkte neben den Pflanzen und Reflektoren zu erken-

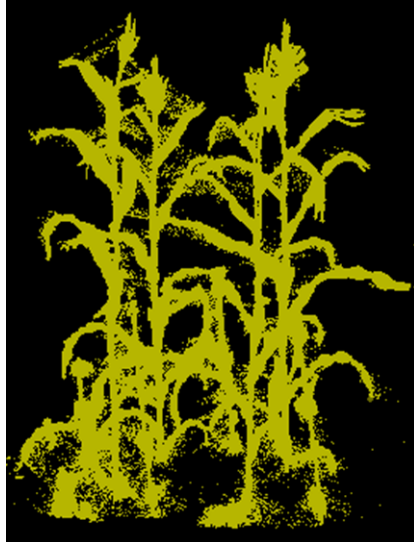


Abbildung 3.10: Zweidimensionale Darstellung einer dreidimensionalen Punktwolke von vier eingescannten Maispflanzen auf dem Schlag A15 der Forschungsplattform Scheyern am 6. September 2013.

nen. Diese können auch durch leichte Bewegungen der gescannten Objekte entstehen. Der Scanner nimmt grundsätzlich von einer Seite zur anderen auf (also von links nach rechts oder umgekehrt), was bei leichtem Wind zur Folge hat, dass einzelne Teile der Pflanzen eventuell mehrmals aufgenommen wurden. Dennoch ist es möglich, ein akzeptables, dreidimensionales Abbild zu erhalten, da in der Regel hierfür schon drei Scans ausreichen, sofern keine Hindernisse zwischen Scanner und Pflanze stehen.

Die weiteren Schritte, um die Architektur der gescannten Pflanzen als Eingabe für das Modell zur Beschreibung des Wasserflusses in Einzelpflanzen (siehe Abschnitte 4.3 und 5.2) zu nutzen, sind exemplarisch in Abbildung 3.11 dargestellt. Zunächst müssen die Punktwolken der einzelnen Pflanzen extrahiert werden. In der Darstellung einer kleinen Pflanze (Abbildung 3.11a) ist zu erkennen, dass sich aufgrund der Pflanzengröße die Blätter kaum durch eventuellen Wind bewegt haben. Somit sind nur wenige Punkte außerhalb des erwarteten Volumens der Pflanze abgebildet. Anders ist dies bei der großen Pflanze (Abbildung 3.11d) in der die weiter oben beschriebene Dopplung der höheren Pflanzenteile sowie deutlich mehr Punkte „außerhalb der Pflanze“ zu erkennen sind.

Die Anwendung des Skelett-Extraktions-Algorithmuses ist in den Abbildungen 3.11b und 3.11e dargestellt. Es wurden unterschiedlichste Werte für den Suchradius zur Bestimmung der Orientierung sowie für die Länge der Zylinderelemente getestet. Für die hier dargestellten Architekturen wurden folgende Werte eingegeben: 0,025 und 0,17

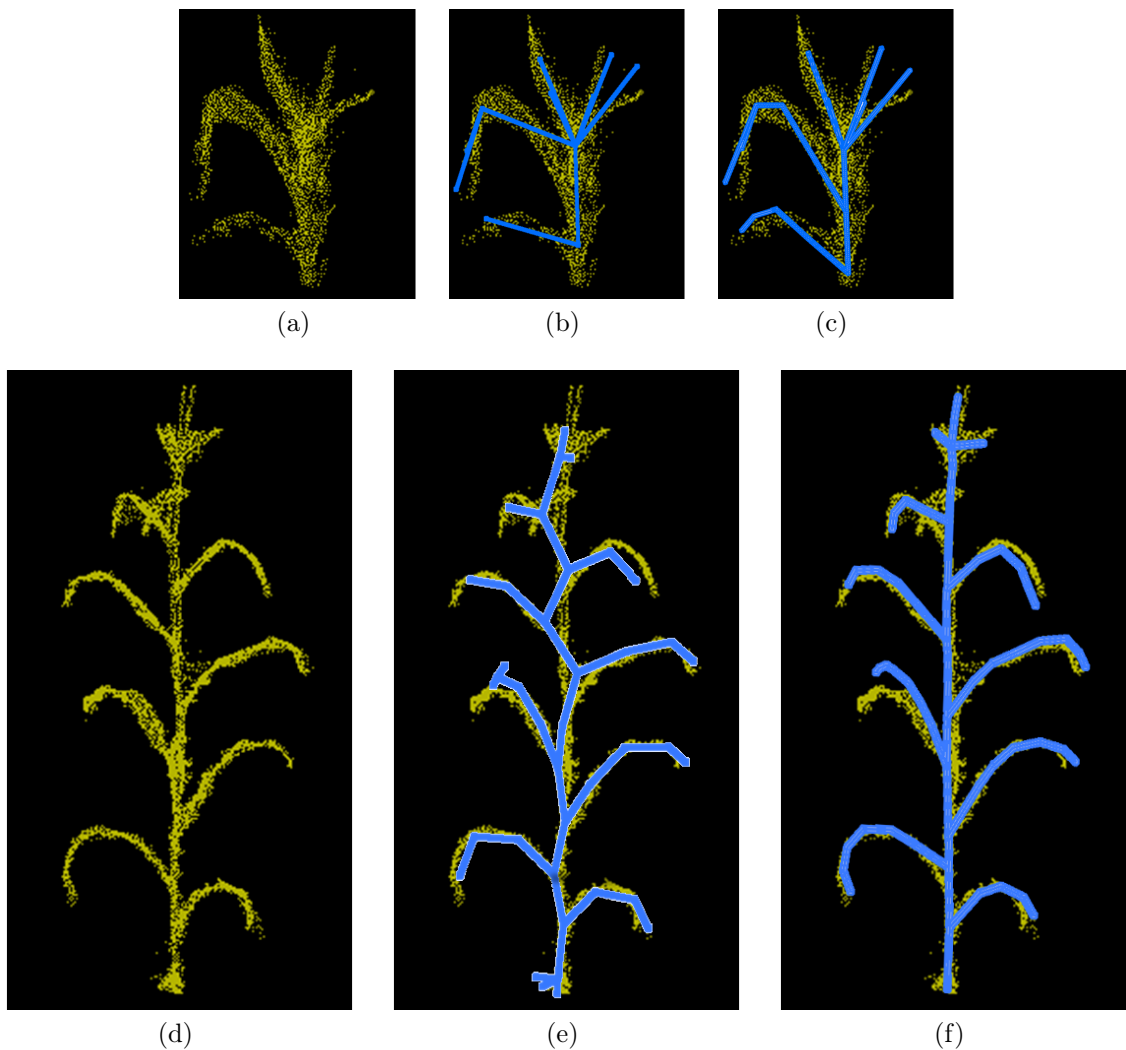


Abbildung 3.11: Zweidimensionale Abbildungen der dreidimensionalen Punktwolken (gelb) von eingescannten Maispflanzen: (a) - (c) kleine Maispflanze auf einem der Lysimeter in Neuherberg am 23. Juli 2013, (d) - (f) große Maispflanze, extrahiert aus Abbildung 3.10, (b) und (d) enthalten zusätzlich die Pflanzenarchitektur (blau), die durch den Skelett-Extraktions-Algorithmus gewonnen wurde, (c) und (f) zeigen manuell korrigierte Pflanzenarchitekturen (blau), die die Architekturen aus (b) und (d) als Ursprung hatten.

(kleine Pflanze) sowie 0,03 und 0,2 (große Pflanze). Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass diese Architekturen die eigentliche Struktur der Pflanzen nur sehr unzureichend darstellen, so ist vor allem der Stängel der großen Pflanze nicht gerade und die Blätter der kleinen Pflanze kaum gebogen. Generell erinnert die hier dargestellte Architektur stark an das Verzweigungsverhalten von Bäumen, für die der Skelett-Extraktions-Algorithmus ursprünglich auch entwickelt wurde (Hentschel u. a. 2013). Die Verwendung anderer Eingabeparameter führte jedoch auch nicht zu zufriedenstellenderen Ergebnissen: eine Erhöhung der Segmentlänge führte zwar zu einem geraderen Stängel, jedoch wurde dadurch die Krümmung der Blätter zu vereinfacht dargestellt. Wurde die Segmentlänge verkürzt, wurde zwar die Krümmung der Blätter realistischer, aber der Stängel wurde krummer und weitere Segmente, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden waren, wurden hinzugefügt. Eine Erhöhung des Suchradiuses hingegen veränderte wiederum die Blatorientierung so, dass der Verlauf der Blätter zu wenig gekrümmt war. Ein sehr kleiner Wert für den Suchradius führte wiederum zu sehr vielen, unrealistischen Verzweigungen und mehr gekrümmten Unterteilungen der Stängel. Somit sind die hier gezeigten Architekturen in gewisser Weise ein Kompromiss, der nicht mehr als eine Näherung an die eigentliche Pflanzenstruktur ist. Dennoch könnten die somit produzierten tlp-Dateien (Dateiformat des *Tulip*-Programms zur Darstellung und Visualisierung von relationalen Daten, Version 4.9.0) als Eingabedatei für das Xylemwasserflussmodell dienen.

Um eine Pflanzenarchitektur zu erhalten, die näher an den tatsächlichen Pflanzenstrukturen sind, wurden in einem weiteren Schritt manuelle Korrekturen an den tlp-Dateien durchgeführt (Abbildungen 3.11c und 3.11f). Insbesondere ist zu erkennen, dass die Krümmung der Blätter und bei den größeren Pflanzen zusätzlich die Krümmung des Stängels berichtigt wurden. Einerseits wurden einzelne Punkte (Nodes) gelöscht, andererseits falls nötig weitere Punkte hinzugefügt, z. B. entlang der Stängel und Blätter der Pflanzen. Um das Abbild des Stängels gerade zu erhalten bzw. zu bekommen, wurden mithilfe zweier Fixpunkte an den Stängelen den durch Mittelwertbildung die dreidimensionalen Koordinaten der dazwischenliegenden Punkte bestimmt. Bei den Blättern wurde ähnlich verfahren, jedoch dienten hier der höchste Punkt sowie der Verzweigungspunkt am Stängel als Fixpunkt um die horizontalen Koordinaten der Punkte zu bestimmen. Hier mussten jedoch im Anschluss noch die vertikalen Koordinaten verschoben werden, um die Krümmung der Blätter zu berücksichtigen. Diese Architekturen stellen nun ein realistischeres Abbild der Pflanzenstruktur dar, auch wenn weiterhin geringe Abweichungen zur Punktwolke zu erkennen sind.

3.5 Messungen von Stängeldurchmessern bei Mais

Die Dendrometer-Messung an den Maispflanzen auf den Neuherberger Lysimetern im Jahr 2014 kann als Vorversuch betrachtet werden, da wie in Abschnitt 2.6 erwähnt keine realistischen Änderungen des Pflanzendurchmessers gemessen wurden. Dennoch war diese Messphase hilfreich, um im darauffolgenden Jahr die Stängeldurchmesser der Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern zu messen.

Abbildung 3.12 zeigt diese Dendrometermessungen, die von 22. Juli bis einschließlich 1. Oktober 2015 durchgeführt wurden. Da die Dendrometer grundsätzlich so angebracht wurden, dass die Auslenkung an der dünnen Seite der Maisstängel gemessen wurde, wurde dieser Durchmesser entsprechend als Ausgangslage gewählt (vgl. Tabelle 3.5). In allen vier Messreihen sind die Tagesgänge deutlich zu erkennen. Das Tagesminimum des Durchmessers wurde um ca. 19 Uhr gemessen, das Tagesmaximum gegen 7 Uhr. Eine generelle Ausnahme ist Pflanze 4 deren Dendrometer nur an den ersten vier Tagen (bis 25. Juli, DOY 206) zufriedenstellende Werte misst. Danach wurde nur Rauschen gemessen, welches sich zwischen einem Durchmesser von 23 540 μm und 23 550 μm einpendelte. Dies ist auf den schwergängigen Messstempel des Dendrometers zurückzuführen, der nach Überprüfung und anschließender Lockerung zwar kurzzeitig aber nicht dauerhaft funktionierte.

Die Stängeldurchmesser von Pflanze 1 und 3 zeigen bis etwa 14. August (DOY 226) einen abnehmenden Trend: bei Pflanze 1 von maximal 22 060 μm auf ein wenig über 21 500 μm , bei Pflanze 3 von maximal 19 950 μm um fast 1 mm auf 19 000 μm . Im Rest des Zeitraums nehmen die Stängeldurchmesser dieser beiden Pflanzen kaum noch ab, jedoch bewegen sich die gemessenen Stängeldurchmesser im Bereich zwischen 21 450 μm und 21 690 μm bzw. zwischen 19 000 μm und 19 200 μm . Im Gegensatz dazu ist bei Pflanze 2 bis zum 7. August (DOY 219) ein Anstieg des Stängeldurchmessers auf knapp 21 000 μm zu beobachten. Danach nimmt der Stängeldurchmesser bis zum Ende der Messperiode auf ca. 20 500 μm ab, wobei die durchschnittliche, tägliche Abnahme des Stängeldurchmessers zum Ende der Messperiode hin geringer wird.

Bei allen Pflanzen fand die größte Änderung des Stängeldurchmessers innerhalb von 24 h zwischen 24. und 25. Juli (DOY 205 und 206) statt. Es wurden Zuwächse des Stängeldurchmessers der Pflanzen 1, 2 und 3 von ca. 200 μm , 300 μm und 450 μm gemessen, die darauffolgenden Abnahmen betrug jedoch nur etwa 150 μm , 250 μm und 300 μm . In dieser Zeit fand gleichzeitig ein starkes Regenereignis (Tagessumme von 12 mm, Abbildung 3.8) statt, welches die Wasseraufnahme durch die Pflanzen und damit den

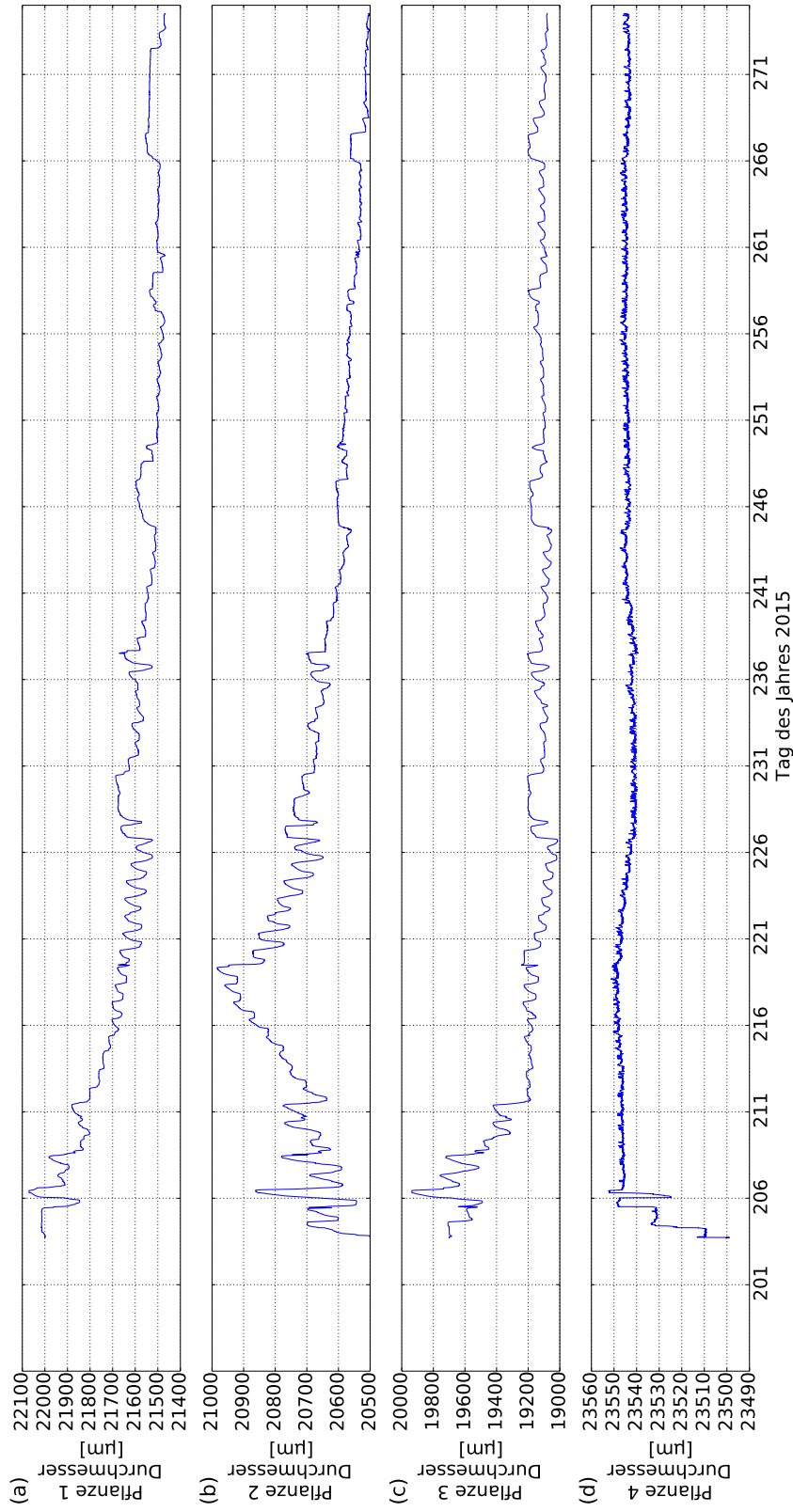


Abbildung 3.12: Zeitreihe der Durchmesser [µm] von 4 verschiedenen Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 22. Juli (DOY 203) bis einschließlich 1. Oktober (DOY 274) 2015. Das Dendrometer an Pflanze 4 hat trotz stetiger Lockerung des beweglichen Messstempels bis auf zu Beginn der Messung nicht zufriedenstellend funktioniert.

Zuwachs des Stängeldurchmessers ermöglichte, während der Saftfluss am 25. Juli deutlich geringer war als an den Tagen zuvor und danach (Abbildung 3.9). Im Allgemeinen sind die täglichen Änderungen des Stängeldurchmessers am Anfang der Messperiode am größten, während die Tagesamplituden gegen Ende meist nur zwischen 20 μm und 100 μm liegen.

Des Weiteren gibt es Perioden, in denen die Stängeldurchmesser kaum schwanken, d. h. nicht im Lauf des Tages abnehmen. Unter anderem wurde dies vom 16. bis 18. August, vom 2. bis 4. und vom 23. bis 24. September (DOY 228 - 230, 245 - 247 und 266 - 267) gemessen. Alle diese Zeiträume sind durch Niederschlag, hohe relative Luftfeuchte sowie niedrige Solarstrahlung und geringe Temperaturamplituden charakterisiert. Ebenso ist der gemessene Saftfluss an diesen Tagen deutlich geringer als an den Tagen zuvor und danach (Tagesmaxima je nach Pflanze zwischen 2 cm h^{-1} und 10 cm h^{-1}).

Die Tagesamplituden der auf diese Weise gemessenen Stängeldurchmesser von Mais waren in derselben Größenordnung (aber etwas kleiner) wie die Tagesamplituden der Stammdurchmesser, die bei Obstbäumen gemessen wurden (Ferreus u. a. 1999; Link u. a. 1998).

3.6 Eddy-Kovarianz: Messung des latenten Wärmeflusses

Der auf der Forschungsplattform Scheyern gemessene latente Wärmefluss [W m^{-2}] ist in Abbildung 3.13 dargestellt. In Abbildung 3.13a sind alle vorliegenden Messpunkte geplottet, d. h. es fehlen im 80-tägigen Zeitraum nur fünf Messpunkte von insgesamt 3840. Am 23. Juli (DOY 204) wurde der Minimalwert des latenten Wärmeflusses von $-263,47 \text{ W m}^{-2}$ (mit Ausnahme von -9999 für nicht vorhandene Werte) gemessen, das Maximum von $601,35 \text{ W m}^{-2}$ am 1. September (DOY 244). Die Tagesmaxima traten in der Regel zwischen 12 und 18 Uhr auf, während nachts niedrige Werte um 0 W m^{-2} und darunter gemessen wurden. Während im Juli und Anfang August der latente Wärmefluss noch 300 W m^{-2} überschritt, lagen die Tagesmaxima Ende August zwischen ca. 100 W m^{-2} und 300 W m^{-2} , im September und Oktober zwischen ca. 50 W m^{-2} und 250 W m^{-2} .

Teilweise besteht auch ein Zusammenhang mit dem gemessenen Wetter. So ist z. B. am 24. August (DOY 236), dem Tag mit dem größten Niederschlag der gemessene latente Wärmefluss sehr gering (maximal etwa 200 W m^{-2}), während dieser an den darauffolgenden zwei Tagen deutlich größer (maximal etwa 300 W m^{-2}) ist. Die Tagesgänge

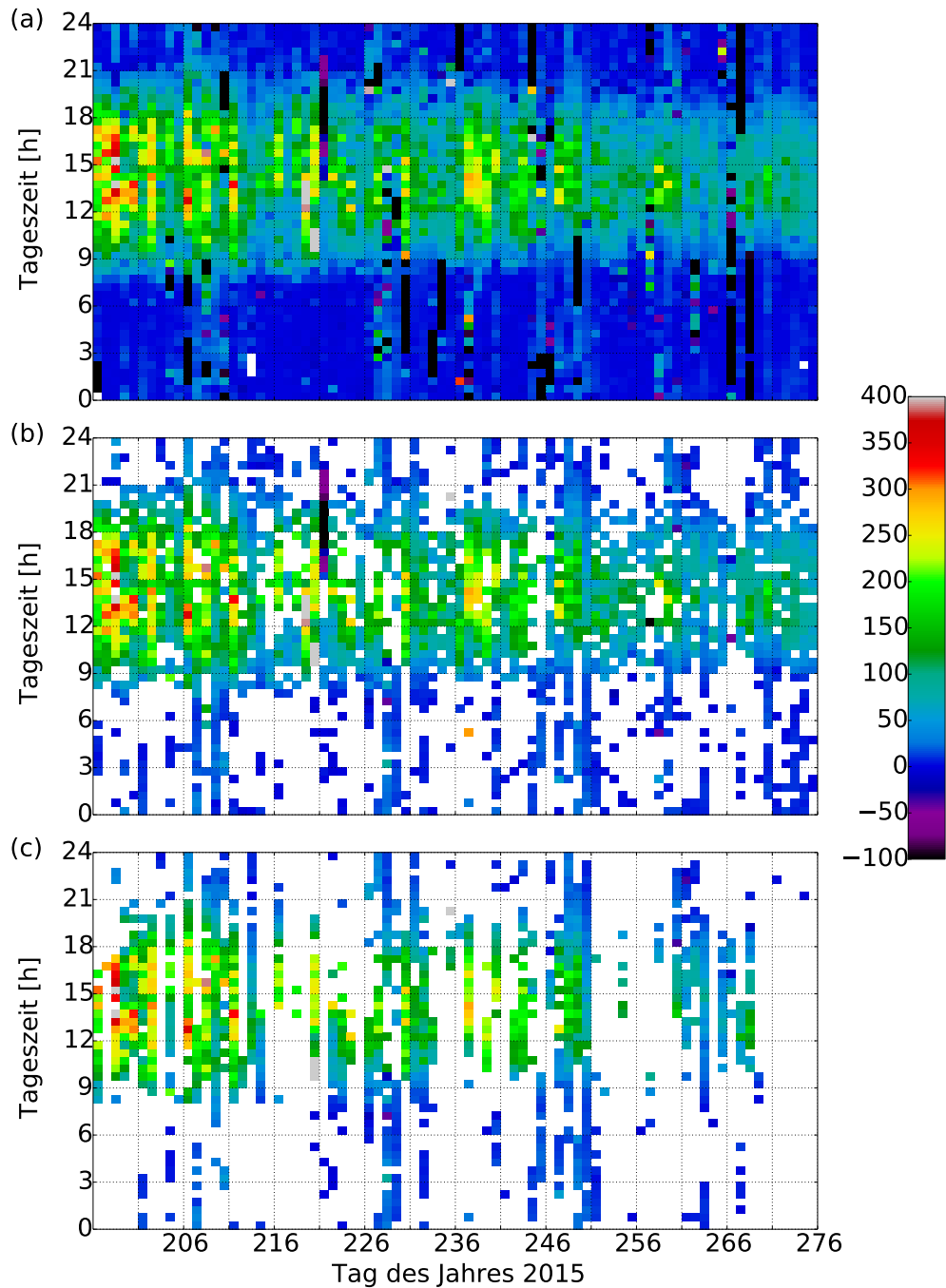


Abbildung 3.13: Streudiagramm (nach Art von Hovmöller) halbstündlicher Mittel des latenten Wärmeflusses [W m^{-2}], der von 15. Juli (DOY 196) bis 3. Oktober (DOY 276) 2015 zwischen den Schlägen A17 und A18 der Forschungsplattform Scheyern gemessen wurde: (a) alle Werte, (b) Berücksichtigung der entsprechenden Qualitätsflags, und (c) Berücksichtigung der entsprechenden Qualitätsflags und der Footprint-Richtung (A17, Maisfeld)

des gemessenen Saftflusses (Abbildung 3.9) ähneln sich jedoch an diesen drei Tagen sehr. Geringe und teils deutlich schwankende latente Wärmeflüsse wurden am 2. und 3. September (DOY 245 - 246) gemessen. Dies steht auch im Einklang mit dem gemessenen Wetter, welches von Niederschlag, hoher relativer Luftfeuchte, niedriger Solarstrahlung und geringen Tagestemperaturamplituden bestimmt ist. Analog dazu weist auch der gemessene Saftfluss aller vier Pflanzen an diesen Tagen niedrige Werte auf und zeigt keinen Tagesgang. Am 25. Juli (DOY 206) hingegen passen die Messdaten nicht zusammen: So erreicht der latente Wärmefluss bis zu 350 W m^{-2} und ist auch deutlich höher als an den Tagen zuvor und danach während der gemessene Saftfluss sich genau gegenläufig verhält. Die gemessene Strahlung (maximal 620 W m^{-2}) und die Temperaturamplitude (ca. 8°C) sind geringer als an den vorherigen und darauffolgenden Tagen, jedoch höher als an anderen Regentagen. Der Niederschlag, welcher an diesem Tag zwischen 0 und 6 Uhr fiel, könnte ein möglicher Grund für die Diskrepanzen zwischen gemessenem Saftfluss und latentem Wärmefluss sein: dadurch, dass viel Wasser in den oberen Bodenschichten verfügbar ist, ist die Evaporation hoch (vgl. Herbst u. a. 1996; Leuning u. a. 1994; Todd u. a. 1991). Gleichzeitig ist die Transpiration – und somit der gemessene Saftfluss – niedrig aufgrund von Interzeptionsverdunstung (vgl. Tolk u. a. 1995). Das Wasser, welches sich auf der Blattoberfläche sammelt, wird verdunstet bevor die Transpiration der Pflanze wieder ansteigt, da der Unterschied im Wasserpotential zwischen Wasser auf der Blattoberfläche und der Atmosphäre größer ist als jener zwischen Wasser in den Blättern und der Atmosphäre. Somit schließen sich hohe gemessene latente Wärmeflüsse und gleichzeitig niedrigerer Saftfluss nicht notwendigerweise aus.

In Abbildung 3.13b sind dieselben Daten wie in Abbildung 3.13a dargestellt, jedoch unter Berücksichtigung der Qualitätsflags, die genau wie der latente Wärmefluss selbst vom Software-Paket TK3 berechnet wurden. In diesem Fall sind noch 51,77 % der Messwerte in der Grafik vorhanden. Das Minimum von $-244,82 \text{ W m}^{-2}$ wurde am 9. August (DOY 221) um 17:30 Uhr gemessen, das Maximum von $503,85 \text{ W m}^{-2}$ am 7. August (DOY 219). Auffällig ist, dass durch dieses Filtern besonders häufig negative Werte und Werte nahe 0 W m^{-2} herausgefiltert wurden. Diese traten vermehrt zwischen 19 und 9 Uhr auf. Doch auch tagsüber existieren manchmal Datenlücken aufgrund der Qualitätsflags. Diese hängen einerseits mit negativ und niedrig gemessenen latenten Wärmeflüssen zusammen, aber sie treten auch dann auf, wenn der gemessene Fluss von einem Zeitpunkt zum nächsten sehr unterschiedlich ist. In dieser Abbildung sticht nun insbesondere der stark negative latente Wärmefluss am 9. August (DOY 221) zwischen 15 und 22 Uhr heraus. Gleichzeitig sind an diesem Tag weder in den Wetterdaten noch

in den Saftflussmessungen Auffälligkeiten zu erkennen. Solche stark negativen Werte des latenten Wärmeflusses, eigentlich gleichbedeutend mit Wasserdampfkondensation und Taubildung, sind sehr untypisch. Normalerweise werden nur nachts in trockenen Gegenden Werte von ca. -50 W m^{-2} gemessen (vgl. Kraus 2004b). Somit werden selbst durch die Qualitätsflags nicht alle unrealistischen Werte herausgefiltert, weshalb eine weitere Überprüfung der Messungen sinnvoll sein kann.

Wird nun zusätzlich noch die Lage des Footprints berücksichtigt, welche durch die horizontale Windrichtung bestimmt ist, erhält man Abbildung 3.13c. Hier sind nur noch 26,88 % aller Messwerte dargestellt, so sind zum Beispiel die stark negativen Messwerte vom 9. August (DOY 221) nicht mehr vorhanden. Um 10 Uhr am 8. August (DOY 220) wurde das Maximum von $482,62 \text{ W m}^{-2}$ registriert, während das Minimum von $-42,72 \text{ W m}^{-2}$ am 16. August (DOY 228) gemessen wurde.

Die Eddy-Kovarianz-Messungen von Meijninger u. a. (2005), mit denen im Bundesland Brandenburg latente Wärmeflüsse aus verschiedenen Feldern ermittelt wurden, liegen zwischen 30 W m^{-2} und 200 W m^{-2} und somit in einem ähnlichen Bereich wie die Messungen in dieser Dissertation.

3.7 Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung

Im Sommer 2014 wurden Trockenmassen, Höhen und Stängeldurchmesser der zehn Maispflanzen auf den zwei Lysimetern in Neuherberg bestimmt (Tabelle 3.2). An allen Pflanzen waren Saftflusssensoren installiert. Mit Ausnahme der Wurzeln haben die Pflanzen auf Lysimeter 43 durchschnittlich eine größere Trockenmasse als jene auf Lysimeter 45. So wiegen die Stängel durchschnittlich 29,42 g bzw. 27,90 g, die Blätter 34,51 g bzw. 33,38 g und die Kolben 88,93 g bzw. 60,76 g. Die Stängel- und Blattmassen der einzelnen Pflanzen unterscheiden sich vergleichsweise wenig, während bei den Kolbenmassen große Unterschiede zwischen den Pflanzen gemessen wurden. Dies liegt aber u. a. auch daran, dass die Kolben bei der Ernte nicht mehr vorhanden waren (Wildverbiss). Die Wurzelmassen liegen im Mittel bei 60,45 g (Lysimeter 43) bzw. 81,99 g (Lysimeter 45). Hier ist jedoch zu beachten, dass möglicherweise nicht alle Wurzeln aus dem Boden entfernt werden konnten. Ohne Berücksichtigung der abgebrochenen Pflanzen erreichten die Maispflanzen auf Lysimeter 43 und 45 eine mittlere Höhe von 189,75 cm und 183 cm. Die Stängeldurchmesser der Pflanzen auf Lysimeter 43 erreich-

Tabelle 3.2: Trockenmassen, Höhen und maximale/minimale Stängeldurchmesser (auf Höhe der Saftflussmessung, d_{\max} und d_{\min}) von zehn Maispflanzen auf den zwei Lysimetern in Neuherberg im Jahr 2014. M bezeichnet die mittlere Pflanze, N die Nördliche, Ö die Östliche, S die Südliche und W die Westliche. Die Fehlwerte (-) bei der Höhenmessung verweisen auf Stängelbruch.

Lysimeter		Stängel	Blätter	Kolben	Wurzeln	Höhe	d_{\max}	d_{\min}
		[g]	[g]	[g]	[g]	[cm]	[cm]	[cm]
43	M	26,48	30,71	53,77	51,02	199	2,06	1,735
	N	31,67	39,23	86,64	114,34	-	1,78	1,655
	Ö	42,78	43,49	145,03	76,64	189	1,79	1,625
	S	27,74	32,24	100,50	35,52	193	1,87	1,79
	W	18,42	26,90	58,70	25,18	178	1,67	1,535
45	M	36,33	50,62	45,45	186,77	-	1,84	1,815
	N	22,10	28,00	70,94	40,90	182	1,98	1,91
	Ö	24,97	25,30	73,11	59,11	190	2,195	2,055
	S	31,00	37,02	93,42	53,85	177	1,885	1,83
	W	25,06	25,97	20,90	69,30	-	1,72	1,68

Tabelle 3.3: Frisch- (F) und Trockenmassen (T) von sieben zufällig und zu unterschiedlichen Zeitpunkten geernteten Pflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Jahr 2015.

	Datum	Stängel		Blätter		Kolben		Wurzeln	
		F	T	F	T	F	T	F	T
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
1.1	26.5	-	0,05	-	0,3	-	-	-	0,19
2.1	15.7	-	49,01	-	52,26	-	-	-	21,69
2.2	15.7	-	22,23	-	29,65	-	-	-	10,51
3.1	24.7	293,99	59,00	262,85	74,50	159,85	22,93	59,41	21,84
3.2	24.7	259,72	56,55	248,16	72,06	144,63	14,41	42,29	16,39
4.1	26.8	216,01	48,54	203,20	53,71	259,20	93,40	160,58	70,42
4.2	26.8	152,22	39,30	129,00	44,72	160,61	72,05	68,85	24,42

ten durchschnittlich 1,834 cm bzw. 1,668 cm, die Pflanzen auf Lysimeter 45 waren etwas dicker: 1,924 cm bzw. 1,858 cm.

Tabelle 3.3 zeigt Erntedaten sowie Frisch- und Trockenmassen von zufällig ausgewählten Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Jahr 2015. Zu Erntezeitpunkt 1 und 2 waren noch keine Kolben vorhanden und es wurden nur

3.7 Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung

Tabelle 3.4: Trockenmassen der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, die mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren. Von Pflanze 1 und Pflanze 3 liegen keine Blattgewichte vor, da die Blätter für die Blattflächenbestimmung verwendet wurden. Die Kolben von Pflanze 4 waren bei der Ernte nicht mehr vorhanden.

Pflanze	Stängel [g]	Blätter [g]	Kolben [g]	Wurzeln [g]
1	67,00	-	134,78	91,75
2	49,19	50,15	104,11	48,96
3	45,19	-	115,44	81,95
4	78,88	57,93	-	79,55

Trockenmassen bestimmt. Bis auf bei der ersten Ernte wurden immer zwei Pflanzen gleichzeitig abgeerntet und gewogen. Die Massen der gleichzeitig geernteten Pflanzen unterscheiden sich teilweise deutlich. So wiegen z. B. die Blätter der Pflanzen 2.1 und 2.2 im getrockneten Zustand 52,26 g bzw. 29,65 g und die Kolben von Pflanzen 4.1 und 4.2 im frischen Zustand 259,20 g bzw. 160,61 g. Aus den Daten kann man auch auf unterschiedliche Wassergehalte in den Einzelpflanzen schließen. So liegt die Frischmasse der Blätter von Pflanze 4.2 bei 64,48 % der entsprechenden Frischmasse von Pflanze 4.1. Nach der Trocknung ist dieser Unterschied geringer. Das Blattgewicht von Pflanze 4.2 beträgt dann 83,26 % des Blattgewichtes von Pflanze 4.1.

Die Trockenmassen der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, welche im Jahr 2015 mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren, sind in Tabelle 3.4 abgebildet. Im Durchschnitt wogen die Stängel 60,07 g, die Blätter von Pflanze 2 und 4 54,04 g, die Kolben von Pflanze 1, 2 und 3 118,11 g und die Wurzeln 75,55 g. Auch hier variieren die Wurzelmassen am meisten, während Kolben- und Blattmassen der einzelnen Pflanzen vergleichsweise ähnlich sind.

Tabelle 3.5 zeigt die auf Höhe der Saftflusssensoren und der Dendrometer mit einer Schieblehre gemessenen Stängeldurchmesser. Die Stängeldurchmesser der Pflanzen 2 und 3 sind weniger groß als jene von Pflanze 1 und 4. Während die minimalen Durchmesser stets mit zunehmender Höhe abnehmen, nehmen die maximalen Durchmesser von Pflanze 1 und 2 zunächst mit steigender Höhe zu (von 23,75 mm auf 25,0 mm bzw. von 21,8 mm auf 22,7 mm). Bei den Pflanzen 3 und 4 wiederum nimmt der maximale Stängeldurchmesser mit zunehmender Höhe ab.

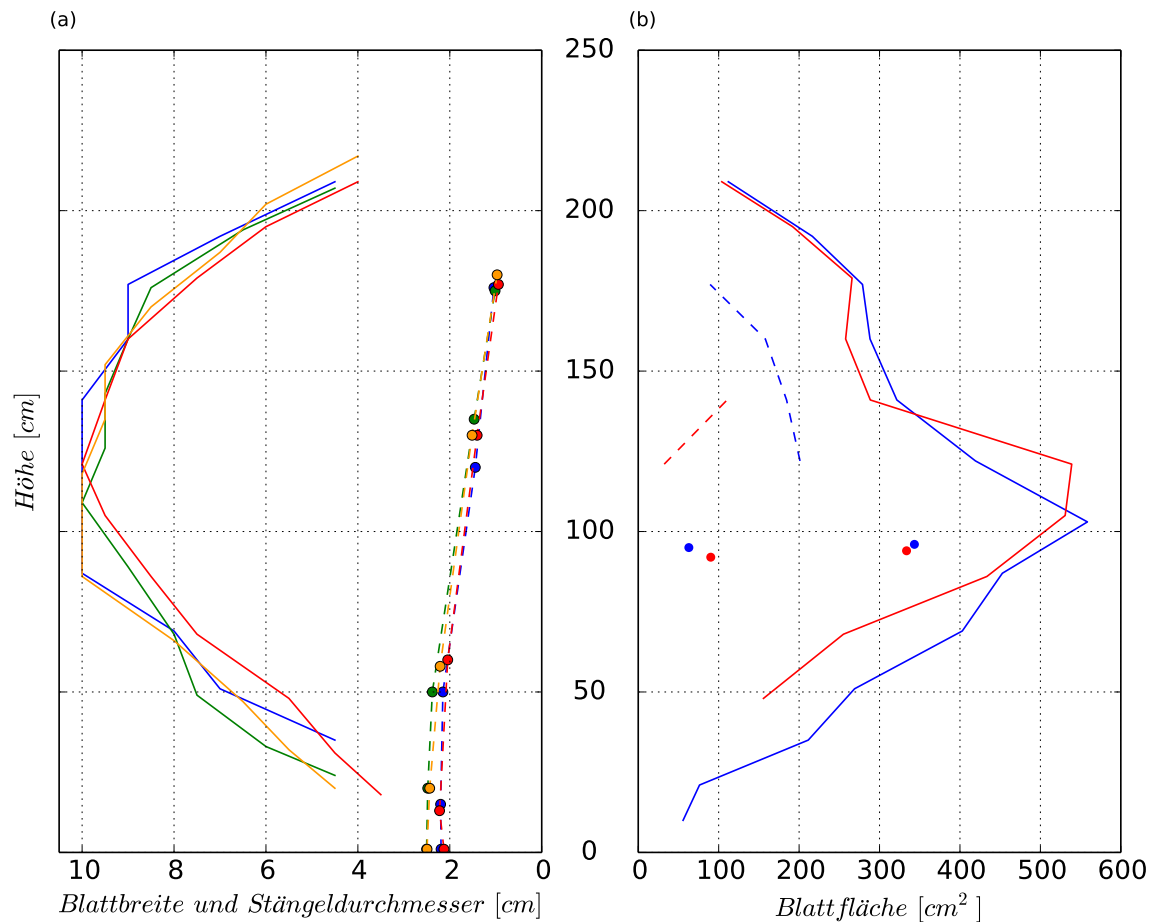


Abbildung 3.14: Größenverhältnisse der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, die im Jahr 2015 mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren:

(a) Maximale Blattbreite [cm] (durchgezogene Linie) und Stängeldurchmesser [cm] (gestrichelte Linie mit Punkten) von Pflanze 1 (blau), Pflanze 2 (grün), Pflanze 3 (rot) und Pflanze 4 (gelb) in Abhängigkeit der Höhe [cm].

(b) Blattfläche [cm²] von Pflanze 1 (blau) und Pflanze 3 (rot) in Abhängigkeit der Höhe des Blattansatzes [cm].

Die durchgezogenen Linien stellen die maximale Blattfläche dar, die gestrichelten Linien die grünen Anteile der Blätter bei Ernte am 1. Oktober 2015. Die Punkte zeigen die Blattflächen der äußeren Kolbenblätter.

3.7 Größen der Pflanzenkompartimente und Blattflächenverteilung

Tabelle 3.5: Maximaler und minimaler Stängeldurchmesser (d_{\min} und d_{\max} [mm]) der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern auf Höhe der Saftflusssensoren sowie der Dendrometer. Da an den Pflanzen 2 und 4 jeweils nur ein Saftflusssensor installiert war, entfällt hier der obere Messwert. Die Anordnung in der Tabelle von links nach rechts entspricht der Anordnung der Messgeräte an der Pflanze, d. h. das Dendrometer war bei Pflanze 1 und 3 zwischen den Saftflusssensoren installiert, bei Pflanze 2 und 4 oberhalb des Saftflusssensors.

Pflanze	Saftfluss unten		Dendrometer		Saftfluss oben	
	d_{\min} [mm]	d_{\max} [mm]	d_{\min} [mm]	d_{\max} [mm]	d_{\min} [mm]	d_{\max} [mm]
1	22,4	23,75	22,0	25,0	21,3	22,8
2	20,9	21,8	20,5	22,7	-	-
3	21,1	21,5	19,7	21,0	17,5	20,0
4	24,0	25,65	23,5	25,0	-	-

In Abbildung 3.14 sind die unterschiedlichen Abmessungen der vier Maispflanzen, welche im Jahr 2015 mit Saftflusssensoren sowie Dendrometern ausgestattet waren, in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. Die Blätter aller vier Pflanzen sind maximal 10 cm breit. Vier Blätter von Pflanze 1, deren Blattansatz zwischen 87 cm und 141 cm Höhe liegt, erreichen diese Breite. Bei Pflanze 2 und 3 ist jeweils nur ein Blatt in 109 cm bzw. 121 cm Höhe so breit, bei Pflanze 4 sind es wiederum drei Blätter mit Blattansätzen zwischen 86 cm und 118 cm Höhe. Die untersten Blätter deren Breite gemessen wurde haben ihren Blattansatz zwischen 18 cm und 35 cm Höhe, die obersten Blätter zwischen 192 cm und 209 cm Höhe. Die untersten und obersten Blätter aller Pflanzen sind zwischen 3,5 cm und 4,5 cm breit. Die von Prévot u. a. (1991) an 56 Pflanzen gemessenen Blattbreiten liegen zwischen 1,8 cm und 12,0 cm. Das etwas kleinere Spektrum der Blattbreiten der in Scheyern vermessenen Pflanzen ist auf die geringere Stichprobenzahl zurückzuführen.

Die mittleren Durchmesser der Stängel aller Pflanzen (zwei pro Höhe, da der Stängelquerschnitt elliptisch ist) nehmen mit zunehmender Höhe ab. In 1 cm Höhe oberhalb der Bodenoberfläche sind die Pflanzen im Durchschnitt zwischen 2,13 cm und 2,50 cm dick. Zwischen 175 cm und 180 cm Höhe sind die Durchmesser der Pflanzen weniger als halb so groß. Diese liegen zwischen 0,94 cm und 1,04 cm. Etwas geringere, maximale Stängeldurchmesser wurden von Gozubenli u. a. (2004) in der Türkei gemessen.

Die Blattflächen der einzelnen Blätter von Pflanze 1 und 3 (Abbildung 3.14b) betragen maximal $558,48 \text{ cm}^2$ (Höhe des Blattansatzes 103 cm) bzw. $530,79 \text{ cm}^2$ (Höhe des Blattansatzes 105 cm). Bei beiden Pflanzen nimmt die Blattfläche nach oben und nach unten hin ab, jedoch zwischen 141 cm und ca. 178 cm Höhe kaum. Pflanze 1 hat inklusive der äußeren Kolbenblätter eine Gesamtblattfläche von $4069,01 \text{ cm}^2$, Pflanze 3 von $3445,90 \text{ cm}^2$. Der grüne Anteil der Blätter war bei der Ernte sehr gering und war nur zwischen 122 cm und 177 cm Höhe (ca. 15,6 % bei Pflanze 1) bzw. 121 cm und 141 cm Höhe (ca. 3,2 % bei Pflanze 3) vorzufinden. Beide Pflanzen hatten zwei Kolben ähnlicher Größe, was sich in den entsprechenden Kolbenblattflächen widerspiegelt. Bei Pflanze 1 betragen diese $62,93 \text{ cm}^2$ und $343,35 \text{ cm}^2$, bei der 3. Pflanze $90,16 \text{ cm}^2$ und $333,59 \text{ cm}^2$. Die von Prévot u. a. (1991) gemessenen Flächen von Einzelblättern bilden ein im Vergleich zu den in Scheyern gemessenen Blattflächen etwas größeres Spektrum von ca. 20 cm^2 bis 720 cm^2 ab.

3.8 Wurzelverteilung

In Abbildung 3.15a und d sind die horizontale und die vertikale Wurzelverteilung von fünf Pflanzen dargestellt. Direkt unterhalb der Maisreihe befinden sich die maximalen Wurzellängendichten zumeist an den horizontalen Positionen, an denen sich auch die Pflanzen befinden. Hier liegen die Wurzellängendichten zwischen $0,1 \text{ cm cm}^{-3}$ und $0,42 \text{ cm cm}^{-3}$. 20 cm von der Reihe entfernt erkennt man aufgrund der Ausbreitung der Maiswurzeln in alle Richtungen mehr lokale Maxima in der entsprechenden Kurve, die auch weniger deutlich ausgeprägt sind. Die Wurzellängendichten nehmen Werte von $0,05 \text{ cm cm}^{-3}$ bis $0,2 \text{ cm cm}^{-3}$ an. Genau zwischen zwei Maisreihen werden die horizontalen Unterschiede in der Durchwurzelungsdichte wieder größer. Diese beträgt zwischen $0,1 \text{ cm cm}^{-3}$ und $0,35 \text{ cm cm}^{-3}$. Auch hier hängen die lokalen Maxima nicht notwendigerweise mit der Position der Maispflanzen zusammen. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass teilweise auch Wurzeln der gegenüberliegenden Maisreihe mitgemessen wurden. Betrachtet man den Durchschnitt der Wurzellängendichten aller drei Messreihen wird die Position der einzelnen Maispflanzen in der Kurve ebenfalls ersichtlich. Diese durchschnittlichen Wurzellängendichten liegen zwischen $0,06 \text{ cm cm}^{-3}$ und $0,225 \text{ cm cm}^{-3}$.

Direkt unterhalb der Maisreihe befindet sich in etwa 8 cm Tiefe die maximale Durchwurzelungsdichte ($0,41 \text{ cm cm}^{-3}$). Sie nimmt bis 37 cm Tiefe ab und beträgt dann etwa $0,08 \text{ cm cm}^{-3}$. In 43 cm Tiefe liegt die Wurzellängendichte bei $0,15 \text{ cm cm}^{-3}$, und nimmt von da an erneut mit der Tiefe ab. Bei ein Viertel und halbem Reihenabstand sind

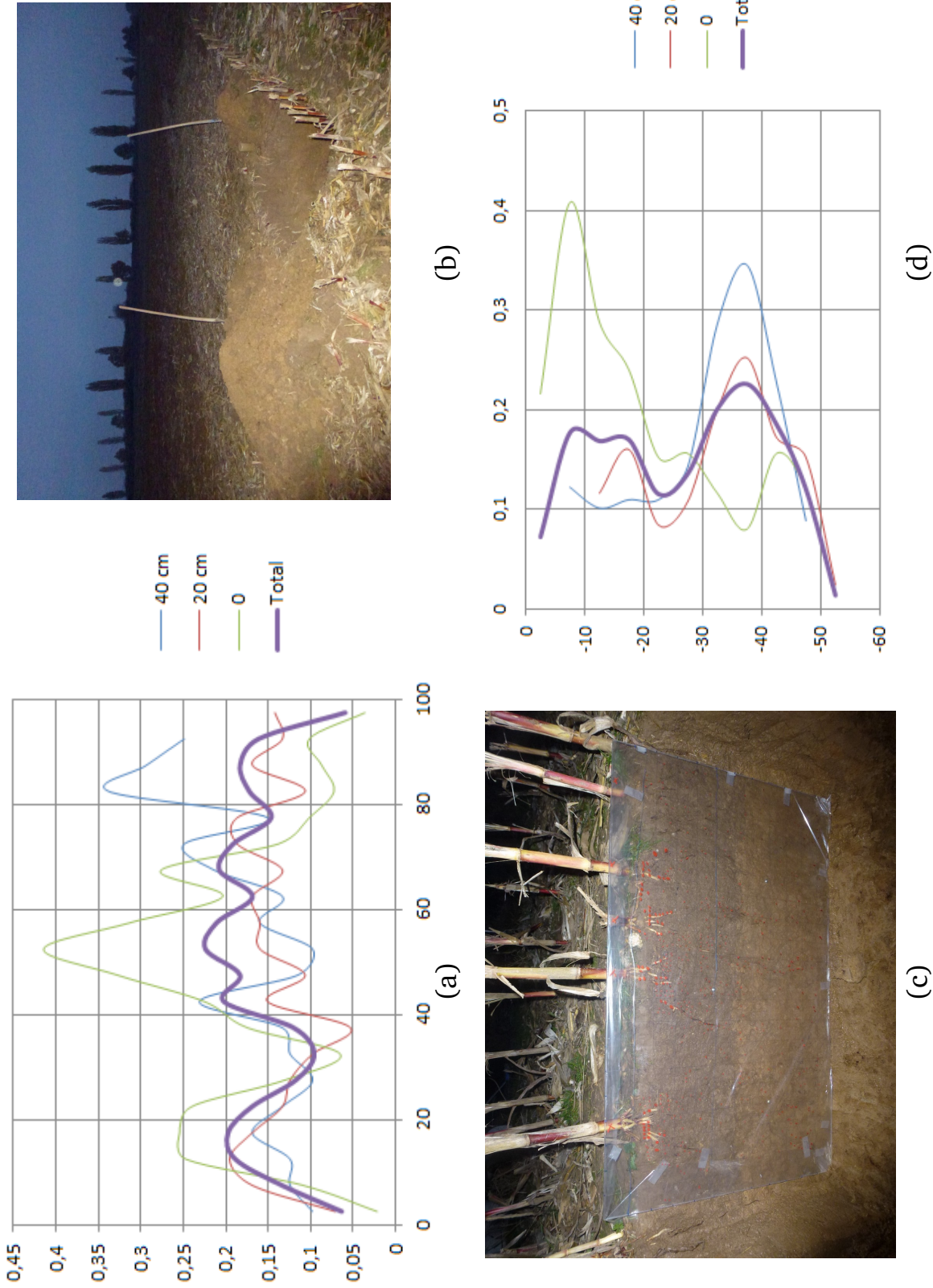


Abbildung 3.15: Wurzelbestimmung am 27. Oktober 2015 im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern: (a) Horizontale Wurzelverteilung [cm cm^{-3}], (b) Ausgehobene Grube, (c) Bild der Plexiglasplatte mit auf der Folie markierten Wurzeln und (d) Vertikale Wurzelverteilung [cm cm^{-3}]. Die Farben grün, rot und blau bezeichnen den Abstand von der Profilwand zur Maisreihe, in lila ist der Durchschnittswert aufgetragen

die Wurzellängendichten bis ca. 23 cm Tiefe gering (maximal $0,15 \text{ cm cm}^{-3}$). Bei beiden Messpositionen wird die maximale Durchwurzelungsdichte in 37 cm Tiefe erreicht. Diese betragen $0,25 \text{ cm cm}^{-3}$ bei 20 cm Abstand und $0,35 \text{ cm cm}^{-3}$ bei 40 cm Abstand von der betrachteten Maisreihe. Auch hier nehmen die Wurzellängendichten mit größerer Tiefe wieder ab. Die Kurve der Durchschnittswerte über alle Messreihen zeigt dann ein größeres lokales Maximum von etwa $0,18 \text{ cm cm}^{-3}$ zwischen 8 cm und 18 cm Tiefe, welches vor allem von den Wurzellängen direkt unterhalb der Maispflanzen bestimmt ist, sowie ein weiteres Maximum in 37 cm Tiefe, welches durch die weiter entfernten Wurzeln zu Stande kommt. Auffällig ist zusätzlich noch die geringe Wurzellängendichte von $0,12 \text{ cm cm}^{-3}$ in 23 cm Tiefe. Ein Grund hierfür könnte die Bodenverdichtung infolge von Bodenbearbeitung sein (vgl. Messungen von Nicoullaud u. a. 1994), die bis in diese Tiefe reichte. Dementsprechend konnten die Maiswurzeln diesen komprimierten Bereich zwar durchdringen, aber aufgrund des geringeren Widerstandes wurde die Wurzelbildung oberhalb und unterhalb dieser Bodenschicht begünstigt.

In anderen Studien (Gao u. a. 2010; Wiesler und Horst 1994) wurden in der Mitte der Wachstumsperiode deutlich höhere Wurzellängendichten von Mais gemessen, nicht jedoch zu Beginn. Da die in diesem Abschnitt vorgestellten Messungen erst zwei Wochen nach Ernte erfolgten, müssen einige Wurzeln jedoch schon zersetzt gewesen sein (vgl. Messungen von Dornbush u. a. 2002), insbesondere da ab Beginn der generativen Phase das Wurzelwachstum stoppt (Mengel und Barber 1974; Peng u. a. 2010). Die von Mosaddeghi u. a. (2009) gemessenen Wurzellängendichten sind wiederum denen aus Scheyern ähnlich. In der Studie von Gao u. a. (2010) verringern sich die Wurzellängendichten mit zunehmendem Abstand von der Maisreihe. Diese Abnahme ist in Scheyern auf dem Schlag A17 nicht zu erkennen.

Kapitel 4

Simulationen: Methoden und Modellbeschreibung

4.1 Das Modellsystem Expert-N

Das Modellsystem Expert-N entstand ursprünglich als Baukastensystem von Einzelmodulen, welche die Stickstoffdynamiken in Boden und Pflanze abbilden sollten. Es wurde von Anfang an als höchstflexibles und modular aufgebautes Modellsystem konzipiert. Je nach Anwendungszweck basieren die Einzelmodule auf einfachen, empirischen oder komplexen, deterministischen Ansätzen. Dabei beschreiben unterschiedliche Modelle oftmals einen bestimmten Prozess auf die gleiche Art, während der Unterschied in den Modellen dadurch bestimmt ist, wie viele Prozesse berücksichtigt werden (Engel und Priesack 1993). Durch den modularen Aufbau lassen sich – unter Zuhilfenahme von Messdaten – die Simulation von Einzelprozessen (welche von verschiedenen Modulen unterschiedlich abgebildet werden können) sowie die Wechselwirkungen zwischen Teilmodulen innerhalb des Gesamtmodells überprüfen. Gleichzeitig ließ sich Expert-N von Beginn an ohne großen Aufwand um weitere (Teil-)Module erweitern. Folgende Modellgruppen wurden als Grundstruktur definiert: Wassertransport, Wärmetransport, Stickstofftransport, Pflanzenwachstum, Bewirtschaftung (Priesack 2006). Diese Modellgruppen wurden in weitere Untermodule aufgeteilt, z. B. „Potentielle Evapotranspiration“, „Aktuelle Evapotranspiration“, „Bodenwasserfluss“ (und Andere) in der Gruppe „Wassertransport“. Oftmals haben bestimmte Module andere Module – auch aus einer unterschiedlichen Modellgruppe – als Bedingung. So benötigen z. B. das Modul „Potentielle Transpiration“ in der Gruppe „Pflanzenwachstum“ das Modul „Potentielle Evapotranspiration“ und das Modul „Aktuelle Evapotranspiration“ das Modul „Aktuelle Transpiration“, um sinnvolle Ergebnisse zu simulieren.

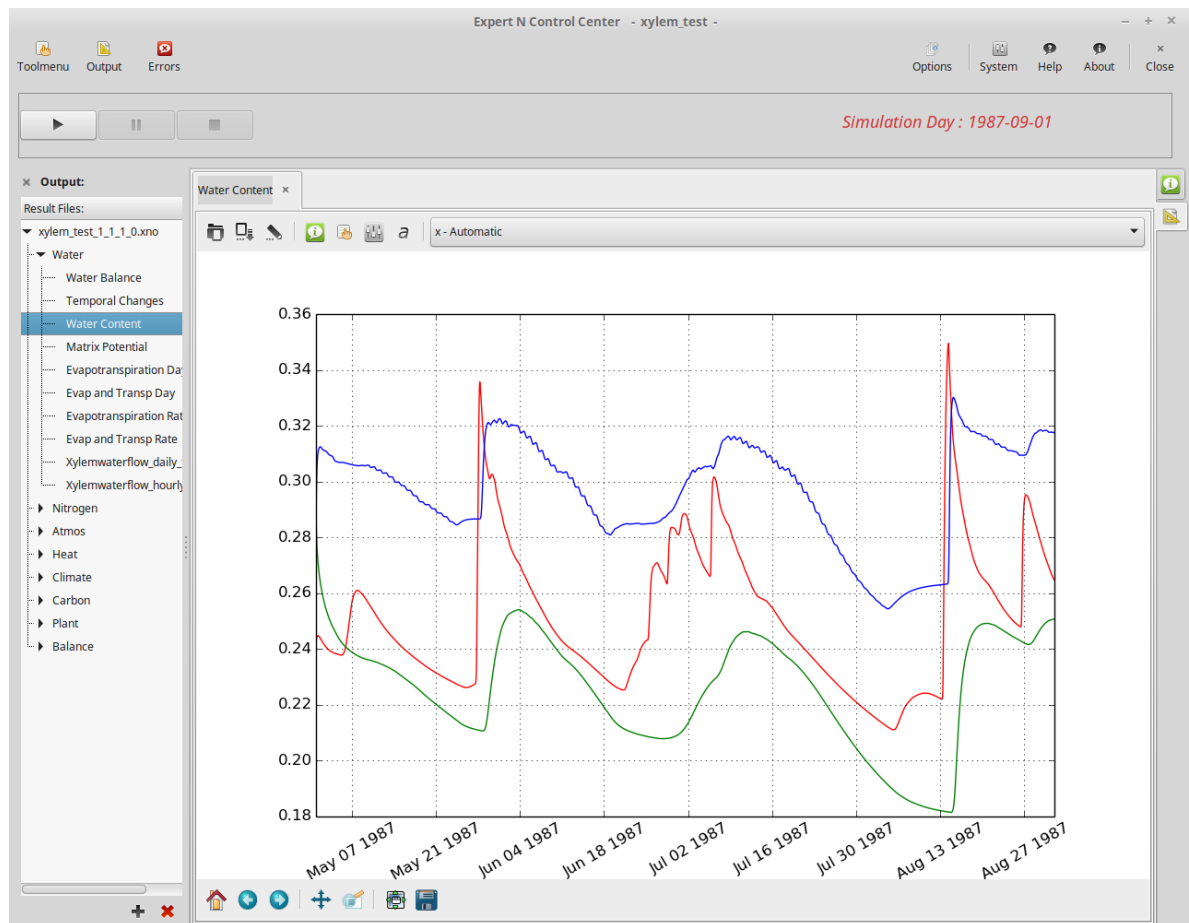


Abbildung 4.1: Hauptfenster der graphischen Benutzeroberfläche von Expert-N 5.0, das Expert-N Control Center.

Das Modellsystem Expert-N wurde von diversen Entwicklern stetig erweitert, z. B. um weitere Prozesse zu integrieren oder um Expert-N mit anderen Modellen zu koppeln. Das Datenmanagement und die sehr umfangreiche Dokumentation der Modellbibliothek Expert-N 3.0 wurde von Priesack und Bauer (2002) und Priesack (2006) im Rahmen der FAM-Berichte 59 und 60 veröffentlicht. Seit Anfang 2011 wird Expert-N 5.0 entwickelt, das den Großteil der Einzelprozesse und Teilmodule aus Expert-N 3.0 beinhaltet (laufend werden weitere Module übertragen), aber sich in einigen Teilen deutlich von der Vorgängerversion unterscheidet. Zunächst ist die neueste Expert-N-Version plattformunabhängig programmiert, d. h. sie ist kompatibel mit Linux (ab Ubuntu Version 12.04 und Suse Linux Enterprise Server 11) und Windows (z. B. Windows XP, Windows 7, Windows 10). Des Weiteren ist die graphische Benutzeroberfläche vom eigentlichen Programm getrennt, was eine direkte Simulation mithilfe von Konfigurationsdateien (für die einzelnen Modellparameter als auch für die Modellkonfiguration an sich) ermöglicht,

ohne die graphische Oberfläche zu benutzen. Somit sind nun auch Simulationen ausschließlich im Terminal möglich, was auch die Anwendung auf Hochleistungsrechnern (Clustersystemen) ermöglicht. Für eine schnellere Simulation auf Hochleistungsrechnern wurde Expert-N 5.0 mithilfe des Message Parsing Interfaces (MPI, Gabriel u. a. 2004) parallelisiert, was die Verteilung eines Projektes auf mehrere Cores ermöglicht. Zusätzlich wurde für Einzelrechner die Parallelisierung mit Open Multi-Processing (OpenMP, Dagum und Menon 1998) implementiert.

Die graphische Oberfläche von Expert-N 5.0 wurde mit dem Toolkit GTK+ (GNU-Image-Manipulation-Program-Toolkit, Krause 2007) unter Verwendung diverser Python-Bibliotheken erstellt. Hier sind unter anderem die NumPy-Bibliothek (Numerical Python, Van der Walt u. a. 2011) zur Verarbeitung großer Datenmengen und die matplotlib-Bibliothek (Hunter 2007) für die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse hervorzuheben. Des Weiteren werden in der graphischen Oberfläche Fehler und Warnungen entsprechend dem vom Nutzer festgelegten Debuglevel angezeigt, ohne dass das Programm unterbrochen wird. Neben dem Plotten der simulierten Variablen gibt es die Möglichkeit, Messdaten oder andere Simulationen (im Expert-N 5.0-Format) einzulesen und graphisch mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. In den Grafiken können gewisse Darstellungsparameter festgelegt und bestimmte Zeiträume oder Abschnitte der y-Achse festgelegt werden. Ebenso können Variablen direkt „gegeneinander“ geplottet werden. Direkt integriert ist auch die Ausgabe der Mess- und Simulationswerte in Tabellenform und die Berechnung von sechs statistischen Maßen.

Eine weitere Änderung wird in Abbildung 4.2 deutlich: die Möglichkeit, auf einem oder mehreren Gittern zu simulieren. Jedes Gitter hat zunächst eine Nummer (Id), wodurch auf mehreren (nicht notwendigerweise gleich großen) Gittern innerhalb eines Projektes simuliert werden kann. Dies kann vor allem für Kopplungen mit anderen Modellen von Bedeutung sein, z. B. wenn innerhalb eines Projektes mehrere Jahre durchlaufend mit unterschiedlichen Modellkonfigurationen simuliert werden sollen. Jeder Punkt eines Gitters ist wiederum durch eine x-Koordinate i und eine y-Koordinate j definitert. Diese Punkte lassen sich einzeln oder gesammelt aktivieren und deaktivieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einen Gitterpunkt in verschiedene Landnutzungen zu unterteilen. Insgesamt wird somit eine einzelne Expert-N-Instanz aus der Nummer des Gitters, den Flächenkoordinaten und der Nummer der Unterteilung gebildet. Für diese letzte Unterteilung wird jedoch nicht ein verschachteltes Gitter generiert, sondern der prozentuale Anteil der jeweiligen Landnutzung angegeben. Eine schematische Darstellung eines Expert-N-Gitters zeigt Abbildung 4.3. Dieses Gitter hat insgesamt neun Gitter-

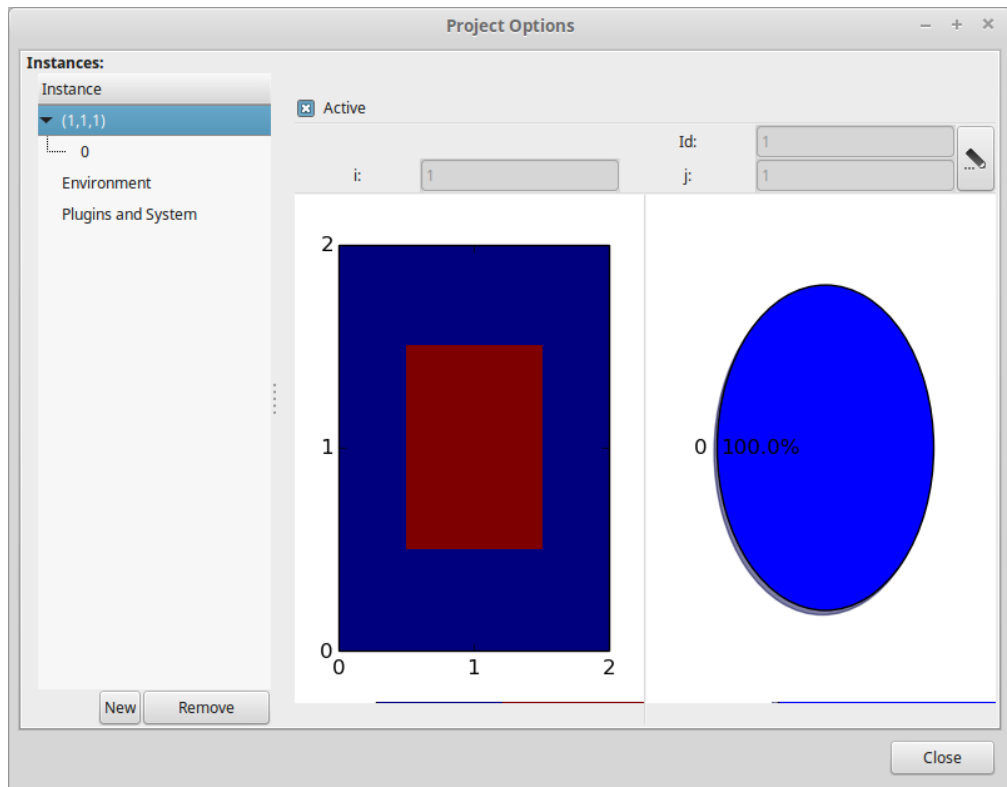


Abbildung 4.2: Optionsfenster für jedes Expert-N-Projekt.

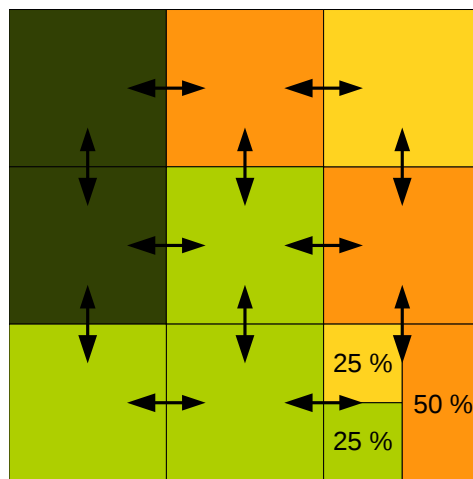


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Gitters von Expert-N mit neun Gitterpunkten. Die Farben stellen unterschiedliche Landnutzungen dar, die Pfeile symbolisieren die Möglichkeit des Variablen austausches zwischen den Gitterpunkten und die Prozentzahlen illustrieren die Möglichkeit der Aufteilung der Gitterpunkte.

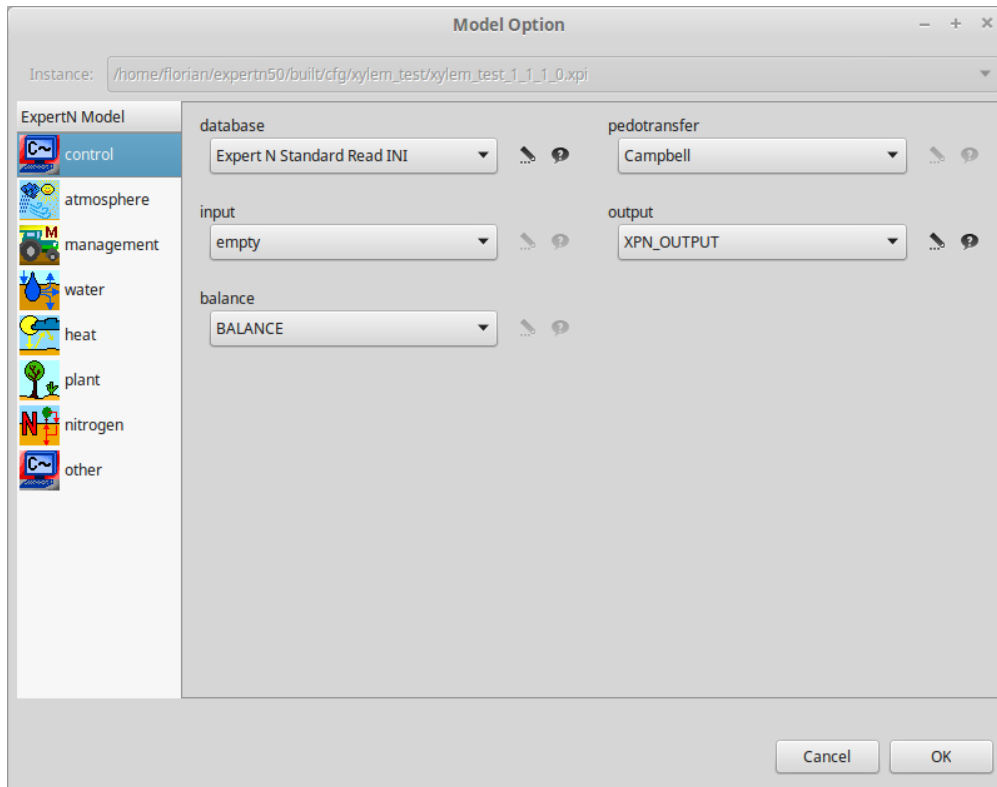


Abbildung 4.4: Auswahlfenster für die Modellkonfiguration einer Expert-N-Instanz.

punkte mit vier unterschiedlichen Landnutzungen, z. B. Wald (dunkelgrün), Grünland (hellgrün), Weizen (Orange) und Mais (Gelb). Der Gitterpunkt rechts unten ist wiederum in drei Landnutzungen aufgeteilt, zwei Teile mit je 25 % und ein Teil mit 50 % Anteil, d. h. auf dieser Ebene wird die genaue lokale Verteilung der Landnutzung nicht aufgelöst. Die Pfeile stehen wiederum für die Möglichkeit der Implementierung von Austauschprozessen zwischen den einzelnen Gitterpunkten. Bei gleich großen Gittern ist auch eine Übertragung von Zustandsvariablen auf denselben Punkt eines anderen Gitters implementierbar. Dies ist besonders dann wichtig, wenn mehrere Jahre hintereinander mit unterschiedlichen Modellkonfigurationen simuliert werden sollen, z. B. wenn sich die Landnutzung mit der Zeit ändert oder eine neue Feldfrucht angebaut wird, da nicht jedes Ackerpflanzenmodell jede Feldfrucht simulieren kann.

Im Unterpunkt „Environment“ können projektspezifische Optionen festgelegt werden, die für alle Instanzen gelten. Unter anderem sind dies grundlegende Parameter wie Simulationsstart und -ende, Simulationszeitschritt, Ausgabezeitschritt, Ausgabezeitraum, sowie Dateityp (Comma-separated values, csv oder Network Common Data Form, NetCDF) und Pfad der Ausgabedatei. Für die Ausgabe besonders wichtig sind die

sogenannte „varlist“-Datei, in der diejenigen Variablen der Expert-N-Struktur angegeben werden, die der Anwender ausgeben möchte, und die „special_output_def“-Datei, die es ermöglicht, Bodenvariablen in einer bestimmten Tiefe oder in einem bestimmten Tiefenbereich des Bodenprofils auszugeben. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass hier die Möglichkeit besteht, die Pflanzen-Konfigurationsdateien festzulegen, so dass diese Datei nicht auf jedem Gitterpunkt einzeln angegeben werden muss.

Abbildung 4.4 zeigt das Auswahlfenster, in dem die Modellkonfiguration einer Expert-N-Instanz ausgewählt wird. Im Vergleich zu Expert-N 3.0 sind die Gruppen „atmosphere“ und „other“ hinzugefügt worden. Erstere Gruppe beinhaltet ein Modell für die Freisetzung von Pollen sowie das Modell „Stabilitätsfunktionen“, Letztere die Schnittstellen, die für die Kopplung mit anderen Modellen von Expert-N benötigt werden. Aktuell ermöglicht Expert-N 5.0 die Kopplung mit den folgenden Modellen:

- Weather Research and Forecasting Model, WRF (Skamarock u. a. 2008)
- Atmospheric Chemistry Observations & Modeling, WRF-Chem (Grell u. a. 2005)
- Mathematical Programming-based Multi-Agent Systems, MP-MAS (Schreinemachers und Berger 2011, Troost und Berger 2014)
- OpenGeoSys, OGS (Kolditz u. a. 2012)

Ein Minimalprojekt von Expert-N, welches als Standardprojekt im Modellkonfigurator vordefiniert ist, besteht aus einer Einlese- und Ausgaberroutine, den Pedotransferfunktionen und den hydraulischen Funktionen. Weitere (Teil-)Module können über die Plugin-Struktur dazugeladen und danach ausgewählt werden. Im Vergleich zur Standardversion von Expert-N 3.0 sind u. a. folgende Modelle und Module zusätzlich implementiert worden:

- Hurley Pasture Modell (Thornley 1997) für Graslandökosysteme inklusive Abgrasen durch Tiere und Ernte
- Treemix als Weiterentwicklung des TreeDyn-Modells (Bossel 1996) für Waldökosysteme
- Penman Monteith nach ASCE (Walter u. a. 2005) zur Berechnung der Potentiellen Evapotranspiration
- Noah Landoberflächenmodell (Chen u. a. 1996) zur Berechnung der Potentiellen Evapotranspiration, der aktuellen Transpiration, der fühlbaren Wärme und der Emissivität des Bodens

- CENTURY zur Simulation von Nitrifikation, Denitrifikation und Mineralisierung, eine Weiterentwicklung des DayCent-Modells (Daily Century, Parton u. a. 1994) für kleine Zeitschritte

Im Allgemeinen wurden die Teilmodelle von Expert-N 5.0 für beliebig kleine Zeitschritte (kleiner als 1 Tag) entwickelt. Ausnahmen hiervon sind z. B. das CERES-Pflanzenmodell oder das FAO-Modell nach Penman-Monteith der potentiellen Evapotranspiration, welche intern mit Zeitschritten von 1 Tag rechnen. Auch hier wurde darauf geachtet, dass der Entzug von Stoffen aus dem Boden und die Transpiration als Austauschparameter zwischen Pflanze und Atmosphäre über den Tag verteilt wird. Das SPASS-Pflanzenmodell wurde wiederum auf kleine Zeitschritte umgeschrieben, wovon vor allem die zeitliche Integration betroffen war. Jedoch musste auch der Gauss-Ansatz mit fünf festen Zeitpunkten an einem Tag zur Berechnung der Photosynthese durch eine angepasste Berechnung zu jedem Zeitschritt ersetzt werden. Die beliebig kleinen Zeitschritte sind besonders dann wichtig, wenn Expert-N nicht als Standalone-Version mit vorgegebenem Wetter betrieben wird, sondern mit dem WRF-Modell gekoppelt ist. Hier besteht die Möglichkeit einer einseitigen Kopplung, bei dem das WRF-Modell Expert-N durch seine Wetterdaten antreibt, oder einer beidseitigen Kopplung, bei der gewisse Parameter wie z. B. der latente und fühlbare Wärmefluss von Expert-N zusätzlich an das WRF-Modell zurückgegeben werden.

Expert-N 5.0 wurde federführend von Christian Klein entwickelt und implementiert. Neben mir selbst waren außerdem noch Christian Biernath, Xiaohong Duan, Peter Hoffmann, Eckart Priesack und Christoph Thieme an der Modellimplementierung und Weiterentwicklung von Expert-N 5.0 beteiligt.

4.2 Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz

Das Lysimeter-System aus Bodensäule und Maispflanzen im Jahr 2013 wurde mithilfe von Expert-N 5.0 (Revision 598) simuliert. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf der Simulation der direkt gemessenen Komponenten der Wasserbilanz. Im Einzelnen waren dies Saftfluss (Transpiration), Evapotranspiration, Perkolation, Änderung der Gesamtwassermenge im Lysimeter und Bodenwassergehalte in 50 cm und 80 cm Tiefe. Zusätzlich werden simulierte Blattflächenindizes und Bodenwassergehalte in 10 cm Tiefe präsentiert. Insgesamt wurden sechs verschiedene Simulationen durchgeführt, die sich durch die Wahl dreier unterschiedlicher Evapotranspirationsmodule und zweier Pflanzenwachstumsmodule unterscheiden. Als Zeitschritt wurde 1 h gewählt. Dies entspricht

auch der zeitlichen Auflösung der Wetterdaten, durch die das Modell angetrieben wurde. Die Wetterdaten stammen vom Messturm des Meteorologischen Instituts München (Ludwig-Maximilians-Universität München) in Garching, welcher etwa 4 km von der Lysimeteranlage entfernt ist. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden auch in Heinlein u. a. (2017) veröffentlicht.

4.2.1 Allgemeine Modellkonfiguration

Tabelle 4.1 zeigt die Expert-N Modellkonfiguration für die Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz im Jahr 2013. An dieser Stelle sollen die einzelnen Teilmodule, welche allen sechs Simulationen gemein sind, kurz beschrieben werden, eine ausführlichere Dokumentation befindet sich in Priesack (2006).

In dieser Studie wurden die Hydraulischen Funktionen und Pedotransferfunktionen gemäß Van Genuchten (1980) und Mualem (1976), und Campbell (1987) ausgewählt. Zunächst wurden die bodenhydraulischen Parameter durch Eingabe der Texturdaten des Bodens (siehe Tabelle 2.1) in die *ROSETTA* Software, Version 1.2, (Schaap u. a. 2001) bestimmt. Somit standen angemessene Startwerte für die ersten Simulationen zur Verfügung. In einem zweiten Schritt wurden einzelne Parameter manuell angepasst, um die Veränderung des Bodens im Vergleich zu 2007 zu berücksichtigen und um die gemessenen Bodenwassergehalte in 50 cm und 80 cm Tiefe realistischer zu simulieren. Im einzelnen waren dies der gesättigte Wassergehalt/die Porosität (welche in der Pedotransferfunktion nach Campbell gleichgesetzt sind), der permanente Welkepunkt, der residuale Wassergehalt, die Van Genuchten Parameter α und n sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Diese Parameter sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

In Abhängigkeit des Matrixpotentials h [mm] wird die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit $K(h)$ [mm d⁻¹] gemäß Van Genuchten (1980) wie folgt berechnet:

$$K(h) = K_{sat} \{ [1 + (\alpha|h|)^n]^{\frac{q}{n-1}} \}^p \{ 1 - (\alpha|h|)^{n-q} [1 + (\alpha|h|)^n]^{\frac{q}{n-1}} \}^r, \quad (4.1)$$

wobei die Einschränkung $m = 1 - q/n$ gilt. Hier sind K_{sat} [mm d⁻¹] die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, α [cm⁻¹], n [-] und m [-] die Van Genuchten Parameter, und $p = 0,5$, $q = 1$ und $r = 2$ Parameterwerte gemäß Mualem (1976).

Der Bodenwasserfluss wurde in dieser Studie nach dem Modell HYDRUS (Šimůnek u. a. 1998) berechnet. Dies erfordert eine numerische Lösung der gemischten Form der räumlich eindimensionalen Richards Gleichung:

Tabelle 4.1: Expert-N Modellkonfiguration zur Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz im Jahr 2013. Die Module „Potentielle Evapotranspiration“ sowie „Pflanzenwachstum und Transpiration“ wurden kombiniert, um die sechs verschiedenen Modellkonfigurationen zu erstellen. Die anderen Module wurden in allen Simulationen gleichermaßen verwendet.

Expert-N Modul	Modulname	Quellen
Pedotransferfunktionen	Campbell	Campbell 1987
Hydraulische Funktionen	Van Genuchten and Mualem	Van Genuchten 1980, Mualem 1976
Bodenwasserfluss	HYDRUS 6.0	Šimůnek u. a. 1998
Bodenwärmetransport	Daisy	Hansen u. a. 1990
Bodenstickstofftransport	LEACHM 3.0	Hutson und Wagenet 1992
Nitrifikation, Denitrifikation, Mineralisierung	CENTURY	entwickelt nach Parton u. a. 1994
Potentielle Evapotranspiration	Penman Monteith ASCE	Walter u. a. 2005
	Penman Monteith FAO	Allen u. a. 1998
	Haude	Haude 1955
Pflanzenwachstum und Transpiration	SPASS	Gayler u. a. 2002; Wang 1997; Wang und Engel 1998, 2000
	CERES	Godwin und Jones 1991; Jones und Kiniry 1986; Ritchie 1991; Ritchie und Godwin 1989; Ritchie u. a. 1987

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S_w. \quad (4.2)$$

In diesem Fall stellen t [d] und z [mm] Zeit und Tiefe, θ [cm³ cm⁻³] den volumetrischen Wassergehalt des Bodens, und S_w [mm mm⁻¹ d⁻¹] die Senke aufgrund von Wurzelwasseraufnahme dar. Zu beachten ist noch, dass das Matrixpotential h , der volumetrische Wassergehalt θ und der Senkenterm S_w von Zeit und Tiefe abhängen, letzterer zusätzlich noch vom Matrixpotential h . Für die obere und untere Randbedingung wurden reine Neumann-Bedingungen gewählt:

Tabelle 4.2: Bodenhydraulische Parameter für die Wasserbilanzsimulationen der Lysimeter im Jahr 2013. θ_{sat} bezeichnet den Wassergehalt bei Sättigung, θ_{res} den residualen Wassergehalt, K_{sat} die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, und α und n die Van Genuchten Parameter.

Schicht- nummer [-]	Schicht- tiefe [cm]	θ_{sat} [cm ³ cm ⁻³]	θ_{res} [cm ³ cm ⁻³]	K_{sat} [cm d ⁻¹]	α [cm ⁻¹]	n [-]
1	0 - 30	0,388	0,157	500,0	0,0365	1,2109
2	30 - 50	0,388	0,157	500,0	0,0365	1,2109
3	50 - 80	0,388	0,160	720,0	0,034	1,4669
4	80 - 200	0,366	0,154	1390,0	0,0309	1,8806

$$q_w(t, z) = -K \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right). \quad (4.3)$$

Da für die untere Randbedingung „freier Abfluss“ ausgewählt wurde vereinfacht sich die Neumann-Bedingung am unteren Rand des Bodenprofils zu $q_{bot} = K$.

Der Ansatz des Daisy-Modells (Hansen u. a. 1990) wurde benutzt, um die Bodenwärmtransportgleichung – ohne Berücksichtigung von Frost-Tau-Zyklen – zu lösen:

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} - \rho_w c_w q_w \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (4.4)$$

In diesen Ansatz fließen die volumetrische Wärmekapazität C_h [J m⁻³ °C⁻¹] und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens K_h [J m⁻¹ d⁻¹ °C⁻¹] (De Vries 1952; De Vries 1963), die Dichte ρ_w [kg m⁻³] und spezifische Wärmekapazität c_w [J kg⁻¹ °C⁻¹] des Bodenwassers sowie der volumetrische Wasserfluss q_w [m d⁻¹] ein.

Der Stickstofftransport im Boden wurde nach dem Modell LEACHN (Hutson und Wagenet 1992) simuliert. Berücksichtigt wird der Transport von Nitrat NO₃⁻, Ammonium NH₄⁺ und Harnstoff (NH₂)₂CO. Der Stickstofftransport im Boden ist einerseits auf molekulare Diffusion, welche durch Konzentrationsunterschiede der jeweiligen Stickstoffverbindung im Bodenwasser oder in der Bodenluft bedingt ist, und andererseits auf Konvektion aufgrund von Bodenwassertransport zurückzuführen. Darüberhinaus müssen Phasenübergänge sowie Quellen und Senken berücksichtigt werden.

Das Modell CENTURY, welches eine Weiterentwicklung für beliebig kleine Zeitschritte des Tagesmodells DayCent (Parton u. a. 1994) ist, wurde verwendet, um Nitrifikation (Umwandlung von Ammonium in Nitrat), Denitrifikation (Umwandlung von Nitrat oder

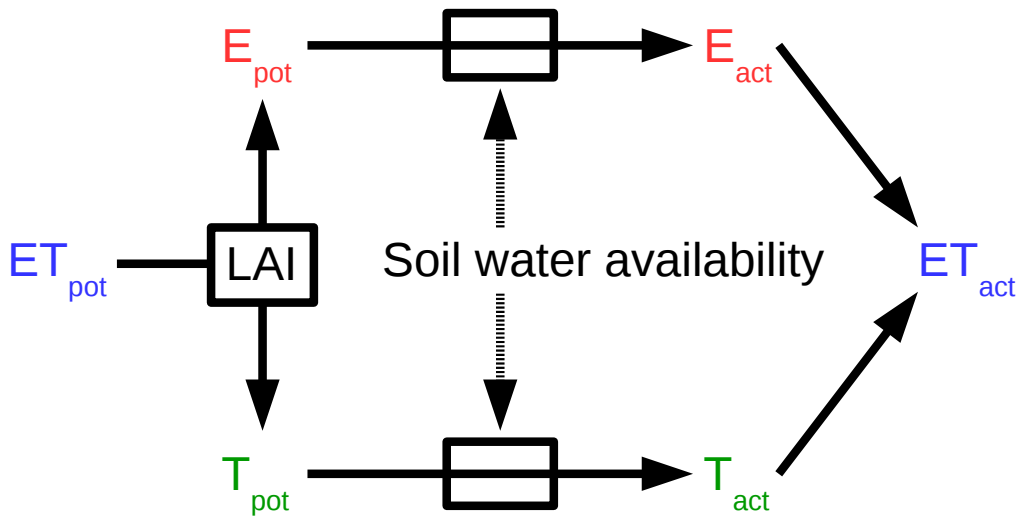


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Berechnung der aktuellen Evapotranspiration. ET, E und T stehen für Evapotranspiration, Evaporation und Transpiration. Die Indizes _{pot} und _{act} stellen potentielle und tatsächliche (aktuelle) Werte dar. LAI ist der Blattflächenindex.

Nitrit in NO, N₂O und N₂) und Mineralisierung (Freisetzung mineralischer Stickstoffverbindungen) zu simulieren. Wichtige Faktoren für diese Prozesse sind der Vorrat des jeweiligen Ausgangsstoffes im Boden, der pH-Wert des Bodens und die Bodentemperatur. Des Weiteren spielen noch der Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt im Boden eine wichtige Rolle bei der Umwandlung der entsprechenden Stickstoffverbindungen.

Alle Modellkonfigurationen haben darüber hinaus den Berechnungsweg für die Aktuelle Evapotranspiration, ET_{act} [mm], gemeinsam. Dieser ist schematisch in Abbildung 4.5 dargestellt. Zunächst wird die potentielle Evapotranspiration, ET_{pot} [mm], von einem der drei Evapotranspirationsmodule (siehe Abschnitt 4.2.2) berechnet. Diese wird dann in potentielle Evaporation, E_{pot} [mm], und potentielle Transpiration, T_{pot} [mm], aufgeteilt:

$$E_{\text{pot}} = [1 - \text{SCF}(\text{LAI})]ET_{\text{pot}}. \quad (4.5)$$

$$T_{\text{pot}} = ET_{\text{pot}} - E_{\text{pot}}. \quad (4.6)$$

SCF bezeichnet den Bodenbedeckungsgrad, welcher ausschließlich vom Blattflächenindex (LAI [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]), siehe Abschnitt 4.2.3) abhängt. Der Bodenbedeckungsgrad wurde in dieser Studie als LAI/3 berechnet. Weitere Bodenbedeckung wurde nicht berücksichtigt. Daher ist die Aufteilung der Evapotranspiration in den Boden- und den Pflanzenteil zwischen den einzelnen Simulationen identisch, wenn ein gleicher LAI-Wert simuliert wird.

Die aktuelle Evaporation, E_{act} [mm], wird dann als das Minimum von potentieller Evaporation und maximalem evaporativen Wasserfluss, der bei der Lösung der Richards Gleichung berechnet wird, bestimmt (Nimah und Hanks 1973).

Beide Pflanzenmodelle CERES und SPASS (Soil-Plant-Atmosphere System Simulation) verfolgen den gleichen Ansatz, um die aktuelle Transpiration (T_{act} [mm]) zu berechnen. Zuerst wird die maximale Wasseraufnahmerate der Pflanze berechnet, die vom phänologischen Entwicklungsstadium abhängt. Dann wird die potentielle Wurzelwasseraufnahme aus jeder numerischen Bodenschicht errechnet. Diese hängt einerseits vom Unterschied zwischen aktuellem Bodenwassergehalt und permanentem Welkepunkt der Bodenschicht, und andererseits von der Wurzellängendichte in der entsprechenden Schicht ab. Die potentielle Wurzelwasseraufnahme pro Bodenschicht, die durch die maximale Wasseraufnahmerate begrenzt ist, wird dann über alle Bodenschichten integriert. Dies ergibt die maximale Gesamtwurzelwasseraufnahme (TRWU [mm]) welche im nächsten Schritt mit T_{pot} verglichen wird. Falls T_{pot} kleiner als die TRWU ist, wird die TRWU entsprechend reduziert. Diese Absenkung wird gleichmäßig auf alle durchwurzelten Bodenschichten verteilt. Wenn durch die Wasserentnahme in einer bestimmten Bodenschicht der Wassergehalt unter den permanenten Welkepunkt fällt, wird die Wasseraufnahme aus dieser Schicht zusätzlich limitiert, und demzufolge auch T_{act} .

Während CERES einen täglichen Wert von T_{act} bestimmt, welcher zwischen 7:12 und 19:12 Uhr mittels einer Kosinus-Funktion über den Tag verteilt wird (Childs und Hanks 1975), berechnet SPASS die Transpirationsrate in jedem Zeitschritt neu.

Schließlich kann ET_{act} als die Summe von E_{act} und T_{act} berechnet werden. Für den Vergleich mit den Saftflussmessungen (siehe Abschnitt 2.4) wurde die modellierte Transpiration außerdem durch Multiplikation mit einem Umrechnungsfaktor, welcher die Lysimeterfläche und die Querschnittsfläche des Wasserleitbahnen berücksichtigt, in modellierten Saftfluss umgerechnet.

4.2.2 Potentielle Evapotranspirationsmodule

4.2.2.1 Penman-Monteith ASCE

Mit dem Penman-Monteith-Ansatz nach der ASCE (American Society of Civil Engineers, Walter u. a. 2005) kann die potentielle Evapotranspiration, ET_{pot} , während beliebig kleiner Zeitschritte simuliert werden. Hierfür wird folgende Gleichung angewandt:

$$ET_{\text{pot}} = 24 * \frac{1/L_{\text{evap}}\Delta(R_n - G) + \gamma C_z / (T_{\text{air}} + 273) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_n u_2)}. \quad (4.7)$$

In dieser Gleichung sind 24 [h d⁻¹] ein Umrechnungsfaktor, L_{evap} [MJ m⁻² mm⁻¹] die spezifische Verdunstungswärme von Wasser, Δ [kPa °C⁻¹] die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve, R_n [MJ m⁻² h⁻¹] die Nettostrahlung an der Oberfläche des Pflanzenbestandes, G [MJ m⁻² h⁻¹] der Bodenwärmefluss an der Bodenoberfläche, γ [kPa °C⁻¹] die Psychrometerkonstante, T_{air} [°C] die aktuelle Lufttemperatur, u_2 [m s⁻¹] die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, e_s [kPa] der Sättigungsdampfdruck, und e_a [kPa] der aktuelle Dampfdruck der Luft. C_z (37 °C mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹) und C_n (tagsüber 0,24 s m⁻¹ und nachts 0,96 s m⁻¹) sind die Zähler- und Nennerkonstanten, welche von Referenztyp und Berechnungsschritt abhängen. Neben dem direkten Einfluss von Temperatur, Windgeschwindigkeit und Strahlung auf ET_{pot} , wird noch die relative Luftfeuchte [%] zur Berechnung von e_a verwendet. Von der Grundidee besteht diese Gleichung aus zwei Summanden, einem Strahlungsterm und einem aerodynamischen Term, der vor allem durch das Sättigungsdefizit ($e_s - e_a$) bestimmt ist. Dieses und somit der ganze aerodynamische Term wird 0, wenn die relative Luftfeuchte 100 % erreicht.

4.2.2.2 Penman-Monteith FAO

Der von der FAO empfohlene Ansatz (Allen u. a. 1998) wurde mit täglichen Zeitschritten angewandt. In diesem Fall ist Gleichung 4.7 ebenfalls gültig, jedoch nehmen dann die Konstanten C_z und C_n andere Werte an: 900 K mm s³ Mg⁻¹ h⁻¹ und 0,34 s m⁻¹. Zusätzlich mussten für diesen Ansatz als Eingabewerte die tägliche Strahlungssummen, sowie die Tagesmittel von Temperatur, Windgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte berechnet werden. Für die Berechnung des täglichen, aktuellen Dampfdruckes und Sättigungsdampfdruckes wurden die Tagesmaxima und -minima der Lufttemperatur verwendet.

4.2.2.3 Haude

Der einfachste Ansatz zur Berechnung von ET_{pot} ist jener von Haude (1955), welcher nur den Sättigungsdampfdruck e_s [hPa] und den aktuellen Dampfdruck e_a [hPa] an jedem Tag um 14:30 MEZ benötigt, deren Differenz dem Sättigungsdefizit entspricht. Somit werden ausschließlich die Lufttemperatur T_{air} [°C] und die relative Luftfeuchte RH [%] in 2 m Höhe als Eingabewerte verwendet:

$$ET_{\text{pot}} = f_{\text{Haude}}(e_s - e_a)_{14:30} = f_{\text{Haude}}(1 - \text{RH}/100)6,11 \exp 17,269T_{\text{air}}/(273,3 + T_{\text{air}}), \quad (4.8)$$

wobei f_{Haude} der Haude-Faktor ist, der vom Monat und der Feldfrucht abhängt. Die unterschiedlichen Haude-Faktoren wurden entsprechend der klimatischen Bedingungen in Deutschland abgeleitet, was die Anwendung an anderen Standorten einschränkt.

4.2.2.4 k_c -Faktoren und Kompabilität mit dem Modellsystem

Während der Ansatz nach ASCE eine direkte Interaktion mit den anderen Teilen des Modellsystems ermöglicht, muss die tägliche potentielle Evapotranspiration, welche mit den Ansätzen nach FAO oder Haude berechnet wurde, noch über den entsprechenden Tag verteilt werden. Gemäß Childs und Hanks (1975) können die täglichen Evapotranspirationsraten mithilfe einer Kosinusfunktion den entsprechenden Zeitpunkten zwischen 7:12 und 19:12 Uhr zugeordnet werden.

Da die Penman-Monteith-Ansätze zunächst einmal nur die Referenzverdunstung eines 0,12 m hohen, hypothetischen Grasbestandes berechnen, und um beim Ansatz nach Haude das Pflanzenwachstum stärker zu berücksichtigen, wurden k_c -Faktoren eingeführt. Diese Faktoren, welche mit der potentiellen Evapotranspiration, ET_{pot} , multipliziert wurden, hängen vom phänologischen Entwicklungsstadium der Pflanzen ab. Sie wurden für diese Studie auf 0,3 (Anfangsstadium), 0,8 (Mitte der Wachstumsperiode) und 0,35 (Endstadium) gesetzt. Diese Werte stehen grundsätzlich im Gegensatz zu den Vorschlägen der FAO (Allen u. a. 1998), welche für Mais einen maximalen k_c -Faktor von bis zu 1,2 als obere Grenze für die Berechnung von ET_{pot} empfehlen. Dieser Wert kann jedoch nur dann angenommen werden, wenn es keine weiteren Limitierungen aufgrund von verminderter Wasserverfügbarkeit, geringer Bestandesdichte oder Krankheiten gibt. Da die Bestandesdichte für dieses Projekt nur 5 Pflanzen pro m^2 betrug, während in typischen Ackerpflanzenbeständen die Bestandesdichten deutlich größer sind (bis zu 10 Pflanzen pro m^2), wurde diese Limitierung durch einen geringeren k_c -Faktors berücksichtigt.

4.2.3 Pflanzenmodule

4.2.3.1 SPASS

In Expert-N 5.0 wurde das SPASS-Modell (Soil-Plant-Atmosphere System Simulation, Gayler u. a. 2002; Wang 1997; Wang und Engel 1998, 2000) für die Anwendung mit beliebig kleinen Zeitschritten umprogrammiert, was eine direkte Interaktion mit den anderen Teilen des Modellsystems ermöglicht. SPASS wurde zunächst als Weizenmodell entwickelt. Später wurde dieses Modell mit weiteren Parametrisierungen und Funktionen ergänzt, um zusätzliche Getreidearten und Kartoffeln simulieren zu können. Die einzelnen Teilmodule von SPASS basieren auf Teilen der Pflanzenwachstumsmodelle CERES (Godwin und Jones 1991; Jones und Kiniry 1986; Ritchie 1991; Ritchie und Godwin 1989; Ritchie u. a. 1987) und SUCROS (u. a. Van Ittersum u. a. 2003).

Bei der Simulation der phänologischen Entwicklung werden drei Hauptphasen unterschieden. Die Phase vor dem Feldaufgang beinhaltet die Keimung und das Sprosswachstum. Diese Prozesse hängen stark mit der Bodentemperatur und -feuchte zusammen. Für die anschließende vegetative und generative Phase wird jeweils eine Minimalanzahl der Tage angegeben, die benötigt wird, um die jeweilige Phase abzuschließen. In dieser Studie waren dies 47 bzw. 36 Tage. Die Entwicklungsrate im SPASS-Modell wird im Allgemeinen durch die Temperatur, die Vernalisation (nicht bei Mais) und die Photoperiode bestimmt.

Die Photosyntheserate wird zunächst pro Einheitsfläche eines Blattes berechnet. Neben der Lichtaufnahme (Lichtsättigungskurve) sind für die Berechnung der Photosynthese die Temperatur, die CO₂-Konzentration der Luft und der Stickstoffgehalt des Blattes von Bedeutung. Zusätzlich berücksichtigt SPASS die Pflanzenhöhe, die Tageslänge und die Beschattung der Blätter. Mittels Gauß-Integration wird in einem weiteren Schritt die Blattphotosyntheserate auf den Bestand hochskaliert.

Die Wachstumsrate der Reserven, welche nach der Blüte verlagert werden können, werden von SPASS aus der Stängelwachstumsrate, dem Reserveanteil des Stängelgewichts und dem Kohlenstoffanteil des Stängels berechnet. Das Biomassewachstum selbst ist durch die Photosyntheserate und die Erhaltungatmung des Bestandes sowie durch die Assimilatverteilung auf die einzelnen Organe Wurzel, Stängel, Blatt, und Korn bestimmt. Letztere kann vom Benutzer angegeben werden, auch in Abhängigkeit der phänologischen Entwicklung. Die simulierte Stickstoffkonzentration der einzelnen Pflanzenkompartimente verändert jedoch die vorgegebene Assimilatverteilung.

Die Simulation der Bestandesbildung beinhaltet die Anlage neuer Blätter und Stängel sowie die Entfaltung der Blätter. Dies manifestiert sich im Modell als Erhöhung des Blattflächenindex (LAI). Auf die Blattbildung haben die Temperatur und die Länge der Photoperiode den größten Einfluss. Da in SPASS das spezifische Blattgewicht abhängig vom phänologischen Entwicklungsstadium ist, kann das Blattflächenwachstum aus dem Wachstum der Blattbiomasse umgerechnet werden.

Die Durchwurzelungstiefe bestimmt sich aus der maximalen Tiefenwachstumsrate, die der Anwender angeben kann, dem Bodenwassergehalt und der Bodentemperatur. Die Wurzellängendichte wird wiederum aus der Wachstumsrate der Wurzelbiomasse bestimmt, wobei Stressfaktoren wie Wasser- und Stickstoffmangel berücksichtigt werden. Dieser Ansatz ist identisch wie jener des CERES-Modells. Dennoch unterscheidet sich das Wurzelwachstum der beiden Modelle aufgrund der unterschiedlichen Assimilatpartitionierungen.

Die Stickstoffverteilung innerhalb der Pflanze berechnet sich aus den Trockengewichten und den spezifischen Stickstoffgehalten der jeweiligen Pflanzenkompartimente. Beide Parameter können somit für eine Veränderung des Stickstoffes innerhalb des Pflanzenbestandes verantwortlich sein. Aus ihnen wird der Stickstoffbedarf bestimmt, welcher mit der potentiellen Entnahme aus dem Boden verglichen wird. Die potentielle Stickstoff-Entnahme wird bei SPASS wie im CERES-Modell simuliert und hängt von der Bodenfeuchte, von der Verfügbarkeit von Ammonium und Nitrat im Boden, von der maximalen Aufnahmerate sowie von der Wurzellängendichte in der jeweiligen Bodenschicht ab. Kann nicht genug Stickstoff aus dem Boden aufgenommen werden, wird das Pflanzenwachstum eingeschränkt.

Seneszenz, welche vermehrt gegen Ende der Wachstumsperiode auftritt, manifestiert sich in der Abnahme der Blattfläche und des Wurzelgewichtes. Neben dem phänologischen Alter sind für das Absterben der Blätter und Wurzeln zusätzlich noch Stickstoff-Stress, Beschattung und geringe Temperaturen verantwortlich. Der kritische Wert für die Seneszenz durch Beschattung wurde in dieser Studie auf $4,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ gesetzt, was jedoch nie erreicht wurde.

4.2.3.2 CERES

Das CERES-Modell (Crop Environment REsource Synthesis, Godwin und Jones 1991; Jones und Kiniry 1986; Ritchie 1991; Ritchie und Godwin 1989; Ritchie u. a. 1987) ermöglicht die Simulation des Wachstums von Weizen, Gerste und Mais. In Expert-N 5.0 werden die CERES-Funktionen genau wie in Expert-N 3.0 einmal täglich aufgerufen.

Tabelle 4.3: Entwicklungs-Stadien (Phasen) des CERES-Modells, aufgeschlüsselt nach den drei Pflanzenarten (modifiziert aus Priesack 2006).

Phase	Ende der jeweiligen Phase bei		
	Mais	Gerste	Weizen
7	-----	Aussaat	-----
8	-----	Keimung	-----
9	-----	Auflaufen	-----
1	Ende juvenile Phase	Beginn Schossen	Anlage apikales Ährchens
2	Beginn Längenwachstum	- Ende Blattwachstum /	Beginn Ährenschieben -
3	Ende Blattwachstum / Beginn Rispschieben	-----	Ende Ährenschieben vor der Blüte -----
4	-----	Beginn Kornfüllung	-----
5	-----	Ende Kornfüllung	-----
6	-----	Physiologische Reife und Ernte	-----

CERES unterscheidet zwischen neun verschiedenen, phänologischen Entwicklungsstadien (Tabelle 4.3). Die Entwicklung der Pflanzen innerhalb eines Stadiums wird mithilfe der thermischen Zeit [$^{\circ}\text{C d}$] modelliert, wobei im Bereich von 0 bis 26°C ein linearer Zusammenhang zwischen Pflanzenentwicklung und Temperatur besteht. Somit errechnet sich die Entwicklungsrate aus der Differenz von mittlerer Lufttemperatur und Basistemperatur (0°C) multipliziert mit dem Zeitschritt (in diesem Fall 1 Tag). Diese täglichen Entwicklungsraten werden für jede Phase aufsummiert. Eine Phase ist abgeschlossen, wenn ihre minimale Dauer, die der Benutzer in der Eingabedatei angeben kann, überschritten wird oder wenn modellinterne Kriterien erfüllt sind.

Die Keimung wird bei Temperaturen über 0°C durch ausreichende Wasserversorgung in der Saattiefe ausgelöst. Die Zeit bis zum Auflaufen definiert sich dann über die Dauer des 9. Stadiums und die Saattiefe. Die Entwicklung in Stadium 1 ist in hohem Maße von der Vernalisation (nicht bei Mais), der Photoperiode und dem Phyllochron, also der thermischen Zeit, welche benötigt wird, dass die Spitze eines Blatts erscheint, abhängig. Die Entwicklung im 2. und 3. Stadium wird bei Gerste und Weizen mithilfe von Temperatursummen simuliert. Bei Mais spielt im 2. Stadium ausschließlich der photoperiodische Effekt eine Rolle. Im 3. Stadium hängt die benötigte thermische Zeit von der maximalen Blattanzahl ab, welche aus der Summe der thermischen Zeiten von Stadium 2 und 3 berechnet wird. In Stadium 4 werden die benötigten thermische Zeiten vom

Benutzer vorgegeben, ebenso in Stadium 6 bei Weizen und Gerste. In Stadium 5 hingegen wird der Bedarf an thermischer Zeit aus dem Reifeparameter der Bundessortenliste ermittelt. Bei Mais wird aus diesem Reifeparameter der Gesamtbedarf an thermischer Zeit von Stadium 4 - 6 bestimmt. Daraus können dann die notwendigen thermischen Zeiten für die Stadien 5 und 6 ermittelt werden, wobei 5 % auf das 6. Stadium entfallen.

Zur Berechnung der Photosynthese wird die Lichtinterzeption mithilfe eines „big leaf“-Ansatzes unter Berücksichtigung des Blattflächenindex und des artenspezifischen Extinktionskoeffizienten simuliert. Das Gesamt-Biomassewachstum wird dann direkt aus der aufgenommenen photoaktiven Strahlung berechnet, es kann aber durch niedrige Temperatur oder verminderte Verfügbarkeit von Wasser und Stickstoff eingeschränkt sein. Die Verteilung der Assimilate auf die einzelnen Pflanzenorgane wird im Gegensatz zu SPASS nicht über Eingabeparameter bestimmt, sondern modellintern in Abhängigkeit der Entwicklungsstadien sowie der Wasser- und Stickstoffverfügbarkeit simuliert. Das Tiefenwachstum und die Längendichte der Wurzeln werden wie im SPASS-Modell (siehe Abschnitt 4.2.3.1) simuliert.

Die Anzahl der Blätter nimmt in CERES in den Stadien 1 und 2 zu und errechnet sich aus der thermischen Zeit eines einzelnen Tages und dem Phyllochron unter Berücksichtigung der maximalen Blattanzahl. Bei Mais wird aus dieser Zunahme der Blattanzahl das Blattflächenwachstum (Zunahme des LAI) - und somit auch die Massenzunahme der Blätter - bestimmt. Bei Weizen hingegen wird zuerst das Biomassewachstum ermittelt und daraus auf die Blattfläche rückgeschlossen. Blattseneszenz setzt bei Weizen ein, sobald vier Blätter ausgebildet sind, wobei sich die Berechnung der Seneszenz je nach Entwicklungsstadium unterscheidet. Bei Mais setzt altersbedingte Seneszenz ab Stadium 2 ein, wobei je nach Entwicklungsstadium Faktoren wie die Blattfläche, die tägliche Temperatursumme oder die benötigte thermische Zeit einer jeweiligen Phase unterschiedlich gewichtet werden. Zusätzlich werden Wasser-, Licht- und Temperaturstress im Modell abgebildet.

Für die Simulation der Stickstoffaufnahme durch die Pflanze wird zunächst ein optimaler Stickstoffgehalt definiert. Dieser ist dadurch bestimmt, dass das Pflanzenwachstum durch einen höheren Stickstoffgehalt nicht ansteigt, aber ein geringerer Stickstoffgehalt das Wachstum mindert. Aus minimalem, optimalem und aktuellem Stickstoffgehalt in der Pflanze werden ein Stickstoff-Stressfaktor sowie der Stickstoffbedarf der Pflanzen bestimmt. Der Bedarf an Stickstoff wird dann wie beim SPASS-Modell (siehe Abschnitt 4.2.3.1) mit der potentiellen Aufnahme aus dem Boden verglichen.

4.3 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes: Xylemfluss

4.3.1 Die Expert-N Modellkonfiguration

Der pflanzeninterne Wassertransport der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern, an denen in 2015 Saftfluss sowie Veränderungen der Stängeldurchmesser gemessen wurden, wurde mit Expert-N 5.0 simuliert. Der Simulationszeitraum wurde auf den Messzeitraum zwischen 1. Juli und 3. Oktober 2015 bei einem Zeitschritt von 1 h eingegrenzt. Die Modellkonfiguration (Tabelle 4.4) ähnelt in einigen Teilen jener der Lysimeter-Wasserbilanzsimulation. Somit sei an dieser Stelle für die Beschreibung der Pedotransferfunktionen, der hydraulischen Funktionen, des Bodenwasserflusses, des Bodenwärme- und Stickstofftransports, der potentiellen Evapotranspiration sowie der Nitrifikation, Denitrifikation und Mineralisierung auf Abschnitt 4.2.1 verwiesen.

Die bodenhydraulischen Eigenschaften des Schlags A17 sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Diese wurden zunächst aus einer unveröffentlichten Studie von Klein u. a. (2017a), in der unter anderem die Energiebilanz desselben Schlags von 2012 bis 2014 simuliert wurde, übernommen und in einem weiteren Schritt an die Messwerte der Bodenwassergehalte aus dem Jahr 2015 angepasst.

Da das Xylemflussmodell die Blattfläche der jeweiligen Pflanzen als Eingabeparameter benötigt wurde diese unter Vorgabe von Messwerten (Abbildung 3.14) berechnet. Für die Blattfläche zum aktuellen Zeitpunkt t gilt:

$$\text{LAI}_t = \text{LAI}_1 + \frac{(\text{LAI}_2 - \text{LAI}_1)}{1 + \exp(6 - 12 \frac{\Delta t_t}{\Delta t_{ges}})}, \quad (4.9)$$

wobei LAI_1 und LAI_2 die gemessenen Blattflächen an zwei verschiedenen Zeitpunkten, Δt_t der Unterschied in Tagen zwischen aktuellem Zeitpunkt und erster Messung, und Δt_{ges} die Anzahl der Tage zwischen den zwei Messungen sind. Es wurde angenommen, dass mit Beginn der Saftflussmessung die Blattfläche der Maispflanzen maximal war und zum Ende der Simulationen nur noch der grüne LAI für die Transpiration relevant ist. Die Blattflächen von Pflanze 1 und 3 betragen bei Simulationsstart $2,98 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ bzw. $2,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ und bei Simulationsende $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ bzw. $0,12 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Für die Pflanzen 2 und 4, deren Blattfläche nicht gemessen wurde, wurden Durchschnittswerte ($2,85 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ bei Simulationsstart und $0,31 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ bei Simulationsende)

Tabelle 4.4: Expert-N Modellkonfiguration zur Simulation des Wasserflusses in vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern im Jahr 2015.

Expert-N Modul	Modulname	Quellen
Pedotransferfunktionen	Campbell	Campbell 1987
Hydraulische Funktionen	Van Genuchten and Mualem	Van Genuchten 1980, Mualem 1976
Bodenwasserfluss	HYDRUS 6.0	Šimůnek u. a. 1998
Bodenwärmetransport	Daisy	Hansen u. a. 1990
Bodenstickstofftransport	LEACHM 3.0	Hutson und Wagenet 1992
Nitrifikation, Denitrifikation, Mineralisierung	CENTURY	entwickelt nach Parton u. a. 1994
Potentielle Evapotranspiration, Latenter Wärmefluss	Penman Monteith ASCE	Walter u. a. 2005
Blattfläche	LEACHM 3.0	Hutson und Wagenet 1992
Aktuelle Transpiration	Xylemflussmodell	modifiziert aus Bittner u. a. 2012b; Hentschel u. a. 2013, 2015; Janott u. a. 2010

angenommen. Die hier verwendeten Blattflächenmessungen sind jenen, die zeitgleich von Christoph Thieme mit weiteren Pflanzen durchgeführt wurden, sehr ähnlich (Thieme 2017, in Vorbereitung).

Der latente Wärmefluss LE [W m^{-2}] wird in Expert-N 5.0 als direkt proportional zur aktuellen Evapotranspiration ET_{act} [mm h^{-1}] angenommen, welche durch die Summe von aktueller Evaporation und aktueller Transpiration bestimmt ist:

$$LE = \frac{10^6}{3600} \rho_w L_{ev} ET_{\text{act}}. \quad (4.10)$$

Hier sind ρ_w die Dichte von Wasser [Mg m^{-3}], L_{ev} [MJ kg^{-1}] der Faktor für die latente Wärme (Walter u. a. 2005) und $10^6/3600$ [$\text{h J s}^{-1} \text{MJ}^{-1}$] ein Umrechnungsfaktor.

Tabelle 4.5: Bodenhydraulische Parameter des Schlags A17 der Forschungsplattform Scheyern (FAM-Datenbank, Schröder u. a. 2002). θ_{sat} bezeichnet den gesättigten Wassergehalt, θ_{res} den residualen Wassergehalt, K_{sat} die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, und α und n die van Genuchten Parameter.

Schicht- nummer	Schicht- tiefe	θ_{sat}	θ_{res}	K_{sat}	α	n
[-]	[cm]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm d ⁻¹]	[cm ⁻¹]	[-]
1	0 - 25	0,336	0,054	2060,0	0,0068	1,749
2	25 - 35	0,279	0,048	2680,0	0,0069	1,749
3	35 - 40	0,279	0,048	2670,0	0,0069	1,749
4	40 - 70	0,383	0,130	2620,0	0,0064	1,727
5	70 - 200	0,383	0,130	2650,0	0,0064	1,647

4.3.2 Das Xylemflussmodell

Das hier verwendete Xylemflussmodell wurde zunächst von Janott u. a. (2010) beschrieben und im Anschluss von Bittner u. a. (2012b) und Hentschel u. a. (2013, 2015) angewendet und erweitert. Die Grundannahme ist, dass der Wasserfluss innerhalb der Pflanze ähnlich wie beim Boden als Wasserfluss in einem porösen Medium mithilfe der Richards-Gleichung (Richards 1931) beschrieben werden kann. Hierbei wird das Xylem als ein Bündel von kleinen, parallelen Kapillargefäßen gesehen, die mit Luft und Wasser gefüllt sind. Nur in gesättigten Xylemkapillaren kann Wasser transportiert werden. Verringert sich das Wasserpotential im Xylem, bilden sich vermehrt Gasblasen im Xylem, die zur Kavitation führen und damit die Wasserleitfähigkeit verringern (vulnerability curve).

4.3.2.1 Beschreibung der Pflanzenarchitektur

Als Eingabe für das Xylemflussmodell werden Pflanzenarchitekturen benötigt. Die Architektur der oberirdischen Teile wurde aus terrestrischen Laserscans gewonnen (siehe Abbildung 3.11). Diese können u. a. im tlp-Format in Expert-N eingelesen werden und mit der *Tulip*-Software (Version 4.9.0) visualisiert werden. Eine graphisch richtig dargestellte tlp-Datei lässt sich allerdings nicht notwendigerweise direkt für die Simulation mit Expert-N verwenden. Aufgrund der spezifischen Einleseroutine gibt es weitere Anforderungen an die Datei. Diese besteht prinzipiell aus drei Listen: einer einfachen durchgehenden Nummerierung aller Knotenpunkte (nodes), einer Liste der Kanten bzw. Verbindungsstücke zwischen den Knoten (edge) und einer Liste der genauen Koordi-

```
(edge 95 9 5)
(edge 96 4 3)
(edge 97 5 3)
(edge 98 6 3)
(edge 99 3 2)
(edge 100 2 1)
(edge 101 1 0)
```

Abbildung 4.6: Ausschnitt der Kantenliste einer tlp-Datei

naten aller Knoten. Besonders wichtig für Expert-N ist die Kantenliste. Abbildung 4.6 zeigt den untersten Ausschnitt dieser Liste.

In der Kantenliste steht die erste Zahl immer für die Kantenummer und die zwei anderen Zahlen für die zwei Knoten, zwischen denen die jeweilige Kante liegt. Daraus ermittelt Expert-N beim Einlesen, welche Knoten aufeinander folgen (sogenannte Nachfolger) und welche Knoten einander vorausgehen (sogenannte Vorgänger). Hierbei wird die Liste von unten nach oben eingelesen. In diesem Beispiel hat Knoten 3 die Knoten 4, 5 und 6 als Nachfolger, und umgekehrt ist der Vorgänger dieser drei Knoten Knoten 3. Im Allgemeinen kann für die Simulation mit Expert-N jeder Knoten beliebig viele Nachfolger, auch gar keine, haben, aber immer nur einen Vorgänger. Somit darf die zweite Zahl in jeder Zeile der Kantenliste nur einmalig vorkommen, da sonst der Vorgänger dieses Knotens nicht eindeutig bestimmt wäre, denn wenn er zwei Mal in der Liste vorkäme hätte er ja zwei verschiedene Vorgänger. Damit hängt zusammen, dass Expert-N der Vor-Vorgänger ebenfalls bekannt sein muss, was in der Praxis bedeutet, dass die dritte Zahl in jeder Zeile weiter unten als zweite Zahl schon einmal eingelesen werden musste, und außerdem kleiner sein muss als die zweite Zahl in ihrer Zeile.

Grundsätzlich stellt Knoten 0 den untersten Punkt des oberirdischen Pflanzenteils dar. Dieser hat gleichzeitig den maximalen Stängeldurchmesser, welcher in der Parameterdatei des Xylemflussmodells angegeben wird. Daraus kann die Xylemquerschnittsfläche berechnet werden. Jeder Kante wird mithilfe eines Röhrenmodells ausgehend von Knoten 0 eine entsprechende Querschnittsfläche zugewiesen. An einer Verzweigung wird die Xylemquerschnittsfläche des Vorgängers auf alle Nachfolger aufgeteilt, ansonsten bleibt die Querschnittsfläche erhalten. Aus den drei räumlichen Koordinaten zweier Knoten wird außerdem die Länge der Kanten bestimmt, jedoch darf keine Kante die Länge 0 mm haben, d. h. es dürfen in der Koordinatenliste keine doppelten Punkte vor-

kommen. Das Volumen eines Xylemzylinder berechnet sich somit aus der Kantenlänge multipliziert mit der entsprechenden Querschnittsfläche.

Ebenso wurden für die Wurzelemente Kantenlänge und Querschnittsfläche berechnet. Die Wurzelstruktur selbst wurde von Expert-N simuliert, wobei die benötigten Parameter in der Parameterdatei des Xylemflussmodells definiert wurden. Die Parameter sind unter anderem die Anzahl der horizontalen und vertikalen Verzweigungen, die Tiefe der untersten Wurzelschicht sowie die Länge der Kanten. Für diese Studie wurden sechs vertikale Ebenen festgelegt bei einer maximalen Wurzeltiefe von 60 cm. Diese Ebenen sind an mehreren Stellen verknüpft. Das Einfügen von zusätzlichen Ebenen oder von realistischeren Wurzelarchitekturen führte zu einer beträchtlichen Verlangsamung der Rechenzeit, weshalb diese Ansätze nicht weiter verfolgt wurden.

4.3.2.2 Beschreibung des Wasserflusses in der Pflanze

Die elementare Zustandsvariable, um den Wasserfluss in der Pflanze zu beschreiben, ist das Wasserpotential des Xylems (Janott u. a. 2010). Gemäß Früh und Kurth (1999) sind für den Wassertransport über weite Strecken im Xylem nur das hydrostatische Potential und das Gravitationspotential relevant, das osmotische Potential kann vernachlässigt werden. Des Weiteren werden in diesem Modell die hydraulischen Eigenschaften des Xylems als homogen angenommen. Unter der Annahme, dass der volumetrische Wassergehalt im Xylem durch das Volumen der Xylemzylinder definiert ist, kann von Massenerhaltung ausgegangen werden. Diese kann mathematisch durch eine eindimensionale Kontinuitätsgleichung ausgedrückt werden. Unter Vernachlässigung von Wasseraustausch zwischen Xylem und Phloem sowie unter Einführung von Quellen- und Senkentermen für die Wurzelwasseraufnahme und für die Transpiration kann man eine eindimensionale Richards-Gleichung für den Wassertransport in der Pflanze bestimmen (Chuang u. a. 2006; Früh und Kurth 1999). Diese Gleichung kann dann entlang eines Graphen der Pflanze gelöst werden, welcher oberirdische und unterirdische Biomasse einschließt. Somit wurde schlussendlich der Ansatz von Bohrer u. a. (2005) um den Wassertransport in den Wurzeln erweitert:

$$\frac{\partial \theta_x(\psi_x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_x(\psi_x) \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial z} + \cos \alpha_x \right) \right] - S_x. \quad (4.11)$$

Für jede Kante bzw. jedes Element der Pflanzenarchitektur x steht hier θ_x [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] für den volumetrischen Wassergehalt des Xylems, der vom Xylemmatrixpotential ψ_x [mm] des entsprechenden Pflanzenelements abhängt. Das Matrixpotential des Xylems

wird in diesem Fall als hydraulische Druckhöhe angegeben. t [s] bezeichnet die Zeit, z [mm] die Länge der Kante und $k_x(\psi_x)$ [mm s^{-1}] ist die hydraulische Leitfähigkeit des Xylems, die vom Matrixpotential abhängt. α_x ist der Zenitwinkel einer jeden Kante und S_x [s^{-1}] ist der Quellen- oder Senkenterm, der die Wurzelwasseraufnahme oder die Transpiration des entsprechenden Pflanzenelements beschreibt.

Aufgrund des Prinzips der Massenerhaltung sind die Xylemwassergehalte durch die Volumina der einzelnen Xylemzylinder definiert. Falls aber auch Entsättigung berücksichtigt werden soll, wird diese über eine Verringerung der Volumina der Xylemelemente beschrieben, während die Elemente selbst als gesättigt angesehen werden. In diesem Fall kann jedoch die für Böden gewöhnliche Form der Wasserretentionskurve, bei der die Wassergehalte im Bereich zwischen 0 mm Wasserpotential und Lufteintrittswert a nahezu konstant sind, nicht angewendet werden. Deshalb wurde in diesem Bereich eine linear fallende Wasserretentionskurve angenommen (Janott u. a. 2010), die eine Erweiterung der Wasserretentionskurve von Chuang u. a. (2006) darstellt:

$$\theta_x(\psi_x) = \begin{cases} \theta_{x,a} \left(\frac{\psi_x}{a}\right)^{-\lambda} & , \text{ falls } \psi_x < a \\ (\epsilon - \theta_{x,a}) \left(\frac{a - \psi_x}{a}\right) + \theta_{x,a} & , \text{ andernfalls} \end{cases}, \quad (4.12)$$

wobei der maximale volumetrische Wassergehalt eines Xylemelements x mit der Porosität ϵ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] des entsprechenden Elements gleichgesetzt wird. Die Porosität ist durch das Verhältnis zwischen maximalem Volumen des Xylemwassers bei Sättigung und dem Gesamtvolumen des jeweiligen Xylemelements gegeben. Aufgrund der Zylindergeometrie der Xylemelemente kann dieses Verhältnis auch durch das Verhältnis der maximal mit Wasser gefüllten Querschnittsfläche des Xylems $s_{xw,max}$ [m^2], und der maximalen Xylemquerschnittsfläche $s_{x,max}$ [m^2], ausgedrückt werden.

$$\epsilon(z) = \frac{s_{xw,max}(z)}{s_{x,max}(z)}. \quad (4.13)$$

Auf ähnliche Weise kann mithilfe der Xylemquerschnittsfläche bei einsetzender Kavitation $s_{xw,a}$ [m^2], auch der Wassergehalt bei Lufteintritt $\theta_{x,a}$ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], bestimmt werden:

$$\theta_{x,a}(z) = \frac{s_{xw,a}(z)}{s_{x,max}(z)}. \quad (4.14)$$

In den Gleichungen 4.13 und 4.14 hängen alle Wassergehalte und Querschnittsflächen von der Höhe bzw. Tiefe z [mm] ab.

Unter der Annahme, dass sich der Wassergehalt im Phloem nur geringfügig ändert, wenn sich das Volumen des wasserleitenden Xylems ändert (Perämäki u. a. 2001), kann

ein Verhältnis zwischen Matrixpotential und Volumenänderung eines Xylemelementes aufgestellt werden (Steppe und Lemeur 2007):

$$\frac{1}{V_x} \frac{dV_x}{d\psi_x} = \frac{d\theta_x}{d\psi_x} = \frac{1}{E}, \quad (4.15)$$

wobei E [mm] den elastischen Modulus des Xylems und V_x das Volumen eines Xylemzylinders beschreibt. Mithilfe dieses Zusammenhangs kann schließlich der Wassergehalt bei Lufteintritt bestimmt werden sofern der Xylemwassergehalt zwischen ϵ und $\theta_{x,a}$ liegt und das Xylem gesättigt ist (Janott u. a. 2010):

$$\theta_{x,a} = \epsilon + \frac{a}{E}. \quad (4.16)$$

Somit ist der Wassergehalt bei Lufteintritt durch den elastischen Modulus, die Porosität und den Lufteintrittswert des Xylems bestimmt. Setzt man diesen Zusammenhang in Gleichung 4.12 ein, kann für $a \leq \psi_x \leq 0$ die aktuelle Querschnittsfläche des Xylems s_x [m²] bestimmt werden:

$$s_x = s_{x,max} \left(1 + \frac{\psi_x}{E} \right). \quad (4.17)$$

Der elastische Modulus E [mm], die Porosität ϵ [m³ m⁻³], der Lufteintrittswert a [mm] und der Exponent λ sind Eingabeparameter, die die Wasserretentionskurve des Xylems bestimmen und für die ganze Pflanze konstant sind.

Die relative Leitfähigkeit des volumetrischen Wasserfluss in einem Kapillarbündel, $K(\theta_x)$ [-], kann in Abhängigkeit des Wassergehaltes θ_x , der Porosität ϵ , des Wassergehaltes bei Lufteintritt $\theta_{x,a}$ und des Exponenten λ berechnet werden. Mithilfe dieser relativen Leitfähigkeit kann die hydraulische Leitfähigkeit k_x [mm s⁻¹] bestimmt werden (Janott u. a. 2010):

$$k_x(\theta_x(z)) = \frac{s_{xw,max}(z)}{s_{xw,max}(0)} k_{max} K(\theta_x), \quad (4.18)$$

wobei k_{max} [mm s⁻¹] die maximale hydraulische Leitfähigkeit des Xylems ist. Diese kann in der Parameterdatei des Xylemflussmodells für die Wurzeln und für die oberirdischen Pflanzenteile separat angegeben werden. Um die unterschiedlichen Querschnittsflächen der Zylinderelemente in der Höhe oder Tiefe z zu berücksichtigen, wird die hydraulische Leitfähigkeit mit dem Verhältnis aus der wassergefüllten Querschnittsfläche in Höhe oder Tiefe z und der wassergefüllten Querschnittsfläche bei Höhe 0 mm normiert (Bohrer u. a. 2005).

4.3.2.3 Bodenwasseraufnahme und Transpiration

Die Aufnahme von Wasser durch die Pflanze aus dem Boden wird über den eindimensionalen, volumetrischen Fluss $j_{r,x}$ [$\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$] beschrieben (Janott u. a. 2010). Dieser Fluss berechnet sich aus dem Produkt der radialen Leitfähigkeit der Rhizosphäre, der Oberfläche des Wurzelementes in der entsprechenden Bodenschicht sowie dem Unterschied der Matrixpotentiale des Xylems und des wurzelnahen Bodens. Die radiale Leitfähigkeit der Rhizosphäre ist durch die radiale Leitfähigkeit der Wurzeln, die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens in unmittelbarer Nähe der Wurzeln und die radiale Dicke des Bodens von 2 mm um die Wurzeln herum (Hinsinger u. a. 2005) bestimmt. Da die Wechselwirkung zwischen Wurzel und Boden einen starken Einfluss auf das Bodenwasser in unmittelbarer Nähe der Wurzeln hat, wurde für diese Berechnung der Wurzelwasseraufnahme das Matrixpotential des Bodens als gewichtetes Mittel zwischen Boden- und Xylem-Matrixpotential angenommen (Janott u. a. 2010). Somit sind die Quellen- bzw. Senkenterme, S_x [$\text{mm}^3 \text{mm}^{-3} \text{s}^{-1}$] und S_w [$\text{mm}^3 \text{mm}^{-3} \text{s}^{-1}$], der Richards-Gleichungen 4.11 und 4.2 bestimmt:

$$S(z) = \sum \frac{j_{r,x}(z)}{V}, \quad (4.19)$$

wobei das Volumen V [mm^3] für den Quellterm als Volumen eines Xylemzylinders und für den Senkenterm als Volumen des Bodens, der das Wurzelement enthält, definiert ist. Verläuft ein Wurzelement durch mehrere numerische Bodenschichten, wird der Senkenterm des Bodens proportional entsprechend der Länge des Wurzelementes innerhalb der verschiedenen Bodenschichten gewichtet. Somit sind die zwei Richards-Gleichungen für die Berechnung des Wasserflusses in Pflanze und Boden über diesen Senkenterm gekoppelt.

Der oberirdische Senkenterm, S_x [$\text{mm}^3 \text{mm}^{-3} \text{s}^{-1}$], der Richards-Gleichung 4.11 ist über die Blatttranspiration $T_{act,lf,x}$ und die Länge des Zylinderelementes, das zu dem entsprechenden Blatt gehört, l_x [mm] definiert:

$$S_x = \frac{T_{act,lf,x}}{l_x}. \quad (4.20)$$

Die Blatttranspiration berechnet sich wie folgt:

$$T_{act,lf,x} = \min\left\{T_{pot,lf,x} \frac{k_{x, stom}(\psi_{x,lf})}{k_{max, stom}}; q_{max,lf}\right\}, \quad (4.21)$$

wobei die maximale Transpirationsrate von einem Blatt $q_{max,lf}$ [mm s^{-1}] über die aktuelle stomatäre Leitfähigkeit des Blattes $k_{x,stom}$ [mm s^{-1}], das aktuelle und minimale Matrixpotential des Blattes $\psi_{x,lf}$ [mm] und $\psi_{0,lf}$ ($-8,5 \cdot 10^5$ mm) sowie die Länge des dazugehörigen Zylinderelementes l_x berechnet wird:

$$q_{max,lf} = k_{x,stom}(\psi_{x,lf}) \frac{\psi_{x,lf} - \psi_{0,lf}}{l_x}. \quad (4.22)$$

Die maximale stomatäre Leitfähigkeit $k_{max,stom}$ ($1,0 \text{ mm s}^{-1}$) wird für die Berechnung der aktuellen, stomatären Leitfähigkeit $k_{x,stom}$ in Abhängigkeit des Matrixpotentials im Blatt verwendet (Bohrer u. a. 2005):

$$k_{x,stom}(\psi_{x,lf}) = k_{max,stom} \exp\left(-\left[\frac{-\psi_{x,lf}}{b}\right]^c\right). \quad (4.23)$$

Hier sind b [mm] und c [-] Eingabeparameter für die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit. Zusätzlich wurde angenommen, dass das Matrixpotential des Blattes dem des dazugehörigen Zylinderelementes entspricht (Janott u. a. 2010).

Die potentielle Transpiration eines Zylinderelementes berechnet sich aus der von Expert-N zur Verfügung gestellten potentiellen Transpiration (vgl. Gleichung 4.5) und der relativen Blattflächenverteilung. Diese Verteilung wird über das Verhältnis zwischen der Blattfläche, die zu dem spezifischen Zylinderelement gehört, und der gesamten Blattfläche der Pflanze berechnet (Janott u. a. 2010).

4.3.2.4 Anpassung des Xylemflussmodells an Mais

Die grundlegendste Anpassung des Xylemflussmodells an Mais beruht auf der Verwendung der spezifischen Pflanzenarchitekturen. Zusätzlich wurden aber auch die Verteilung der Blattfläche auf die Zylinderelemente und einzelne pflanzenspezifische Parameter angepasst.

Die Blattfläche, die zu den einzelnen Zylinderelementen gehört, kann entweder von Expert-N eingelesen werden oder wird wie bei der Transpirations-Simulation von Bäumen als proportional zur Länge des dazugehörigen Zylinderelementes angenommen. In letzterem Fall wird zusätzlich angenommen, dass ein Blatt immer am Endpunkt eines Astes anliegt, d. h. an einem Element, das keinen Nachfolger hat (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Diese Annahme kann jedoch nicht auf Maispflanzen übertragen werden, da die Blätter in den Graphen der Pflanzenarchitektur (Abbildung 3.11) ebenfalls als Teile der Pflanzenarchitektur dargestellt sind.

Tabelle 4.6: Originale und an Mais angepasste Pflanzenparameter für das Xylemflussmodell mit Quellenangaben.

Variable	Kürzel	Einheit	Original	Anpassung
Reaktion der Stomata	b	[mm]	$2,29 \cdot 10^5$ ^a	$1,8 \cdot 10^5$ ^f
Reaktion der Stomata	c	[-]	3,5 ^a	2,6 ^f
Lufttrittswert, Brooks & Corey A	a	[mm]	$-3,5 \cdot 10^5$ ^b	$-3,5 \cdot 10^5$
Brooks & Corey Exponent	λ	[-]	0,86 ^b	0,86
Elastischer Modulus	E	[mm]	$3,5 \cdot 10^6$ ^b	$1,3 \cdot 10^6$ ^g
Maximale hydraulische Leitfähigkeit (oberirdische Pflanzenteile)	k_{max}	[mm s ⁻¹]	0,017 ^c	0,011
Maximale hydraulische Leitfähigkeit (Wurzeln)	k_{max}	[mm s ⁻¹]	0,13 ^c	0,1
Radiale Leitfähigkeit der Rhizosphäre		[s ⁻¹]	$4,7 \cdot 10^{-10}$ ^d	$2,6 \cdot 10^{-10}$ ^h
Xylemporosität	ϵ	[m ³ m ⁻³]	0,52 ^e	0,52

^a Köcher u. a. 2009

^b Oertli 1993

^c Bittner u. a. 2012b

^d Korn 2004

^e Gebauer u. a. 2008

^f Li u. a. 2009

^g Steudle u. a. 1987

^h Frensch und Steudle 1989

Deshalb wurde für die Simulation des Wasserflusses in Mais die Blattfläche modellintern entlang des Blattes verteilt. Hierfür wurde zunächst aus den Architekturdaten die Gesamtlänge L [mm] jedes Blattes als Summe der Länge der Blattelemente i bestimmt. Gemäß Prévot u. a. (1991) ist die Länge vollständig entwickelter Blätter direkt proportional zur maximalen Blattbreite B [mm] mit dem Proportionalitätsfaktor 0,106:

$$B = 0,106L. \quad (4.24)$$

Die Blattfläche eines Blattelements wurde dann als Produkt von Breite b_i [mm] und Länge l_i [mm] des jeweiligen Blattelements berechnet, wobei der Einfachheit halber angenommen wurde, dass die Blattfläche der einzelnen Blattelemente der Form eines gleichschenkligen Trapezes angenähert werden können. Deshalb wurde die Breite b_i an der mittleren Position p_i [mm] jedes Blattelements gemäß den Ansätzen für vollständig entwickelte Blätter von Fournier (1998) und Prévot u. a. (1991) berechnet:

$$b_i = B\left(-2,50\frac{p_i^2}{L} + 1,84\frac{p_i}{L} + 0,66\right). \quad (4.25)$$

Als erste Näherung wurden die pflanzenspezifischen Parameter aus früheren Studien (Bittner u. a. 2012a,b; Hentschel u. a. 2013, 2015; Janott u. a. 2010), in denen der Was-

serfluss in Bäumen modelliert wurde, übernommen. Einige dieser Parameter wurden jedoch im Rahmen dieser Studie angepasst, um die Transpiration von Mais realistischer im Modell abbilden zu können. Die ursprünglichen und angepassten Parameter sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

Die maximalen Stängeldurchmesser der Maispflanzen wurden 1 cm über der Bodenoberfläche gemessen und betragen für die vier Pflanzen 2,19 cm, 2,505 cm, 2,1275 cm und 2,495 cm. Diese Werte wurden ebenfalls in der Parameterdatei der einzelnen Pflanzen angegeben.

4.4 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen: Scaling

Im Rahmen von AgMIP und MACSUR wurden Simulationen des Wachstums von Mais und Winterweizen in Nordrhein-Westfalen von 1982 bis 2011 mit unterschiedlichen Gittergrößen durchgeführt. Hierbei sind mehrere Publikationen (Hoffmann u. a. 2016; Van Bussel u. a. 2016; Zhao u. a. 2016) entstanden, die in Abschnitt 1.5 kurz beschrieben sind. Insgesamt gab es drei Phasen: in der ersten wurde die Skalierung des Wetters analysiert, in der zweiten die Skalierung des Bodens und in der dritten die Skalierung des Managements. Simulationsergebnisse von Expert-N 5.0 (Winterweizenwachstum) trugen zu diesem Modellvergleich bei. Die Expert-N-Simulationen wurden von Christian Biernath, Christian Klein, Eckart Priesack und mir durchgeführt.

4.4.1 Konfiguration von Expert-N 5.0 und Simulationsmethode

Expert-N 5.0 wurde für dieses Projekt mit stündlichen Zeitschritten zur Simulation des Winterweizenwachstums im Zeitraum von 1. September 1982 bis 2. Januar 2012 betrieben. Da als Ausgabe immer nur ein jährlicher Wert (je nach Variable entweder eine kumulative Summe, z. B. bei der Evapotranspiration, oder ein konkreter Wert, z. B. der Kornertrag bei der Ernte) verlangt war, wurde nach anfänglichen Tests mit täglichen Ausgaben nur ein Wert pro Jahr, jeweils am 31. Dezember, ausgegeben. Dies konnte den andernfalls sehr großen Speicherbedarf deutlich reduzieren.

Die Ausgabe wurde in einem weiteren Schritt automatisch qualitätsgeprüft, indem die Simulationsergebnisse von jedem Gitterpunkt und jedem Jahr auf gewisse Kriterien überprüft wurden: Ertrag größer als 1 kg ha^{-1} , gesamte oberirdische Biomasse größer als 3 kg ha^{-1} , maximaler LAI größer als $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, und phänologische Entwicklung vollstän-

Tabelle 4.7: Expert-N Modellkonfiguration für die 30-jährigen AgMIP- und MACSUR-Simulationen von Nordrhein-Westfalen.

Expert-N Modul	Modulname	Quellen
Pedotransferfunktionen	Campbell	Campbell 1987
Hydraulische Funktionen	Van Genuchten and Mualem	Van Genuchten 1980, Mualem 1976
Bodenwasserfluss	HYDRUS 6.0	Šimůnek u. a. 1998
Potentielle Evapotranspiration	Penman Monteith ASCE	Walter u. a. 2005
Energiebilanz	Penman Monteith	Monteith 1965, 1981; Penman 1948
Bodenwärmetransport	Daisy	Hansen u. a. 1990
Bodenstickstofftransport, Nitrifikation, Denitrifikation, Mineralisierung, Harnstoff-Hydrolyse	LEACHM 3.0	Hutson und Wagenet 1992
Pflanzenwachstum	SPASS	Gayler u. a. 2002; Wang 1997; Wang und Engel 1998, 2000
Düngung	Schaaf	verändert aus Schaaf 1998

dig abgeschlossen. Gitterpunkte, die diese Kriterien nicht erfüllten, wurden im nächsten Schritt manuell auf Plausibilität überprüft. So ist z. B. eine nicht abgeschlossene phänologische Entwicklung auf einem eher kälteren Gitterpunkt in manchen Jahren nicht unüblich und deutet deshalb auch nicht auf eine fehlerhafte Simulation hin. War das Ergebnis jedoch nicht plausibel, wurden die entsprechenden Gitterpunkte erneut gerechnet und dabei gezielt Fehler gesucht. Ein sinnvoller Nebeneffekt dieser Analysen war, dass Expert-N 5.0 durch diese Anwendung umfangreich getestet wurde und so Unzulänglichkeiten im Modell beseitigt werden konnten.

In Tabelle 4.7 ist die allgemeine Modellkonfiguration für diese Studie abgebildet, d. h. die Simulationen der einzelnen Gitterpunkte und Jahre unterschieden sich ausschließlich durch ihre unterschiedlichen Eingabeparameter. Da für diese Simulationen eine Eingabe der Texturdaten des Bodens in ein Modell zur Abschätzung der bodenhydraulischen Parameter, z. B. *ROSETTA* (Schaap u. a. 2001), nicht praktikabel erschien, wurden die modellinternen Pedotransferfunktionen nach Campbell verwendet. Mithilfe von Re-

gressionsgleichungen wurden somit die Parameter Campbell A [kPa] und B [-] sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit aus der Lagerungsdichte sowie den Texturdaten des Bodens errechnet.

Für eine kurze Beschreibung der hydraulischen Funktionen, und der Modelle für den Bodenwasserfluss, die potentielle Evapotranspiration, den Bodenwärme- und Stickstofftransport und das Pflanzenwachstum sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Teile von Abschnitt 4.2 verwiesen.

Die Energiebilanz, also latente Wärme, fühlbare Wärme, Bodenwärmefluss und Nettostrahlung, wurde gemäß den Ansätzen von Penman (1948) und Monteith (1965, 1981) berechnet. Als Ausgangspunkt dafür dient die Energiebilanzgleichung an der Erdoberfläche. Der latente Wärmefluss nimmt eine analoge Form zu Gleichung 4.7 an, mit der die potentielle Evapotranspiration berechnet wird. Der fühlbare Wärmefluss berechnet sich dann aus der Differenz von aufgenommener Strahlung und latentem Wärmefluss. Die aufgenommene Strahlung wiederum ist die Differenz aus Nettostrahlung und Bodenwärmefluss. Die Berechnung der Nettostrahlung berücksichtigt die einfallende, kurzwellige Solarstrahlung und deren Reflexion sowie die temperaturbedingte, langwellige Abstrahlung der Bodenoberfläche. Der Bodenwärmefluss liegt tagsüber bei 10 % und nachts bei 50 % der Nettostrahlung.

Die Nitrifikation in einer Bodenschicht errechnet sich im Modell LEACHN (Hutson und Wagenet 1992) aus der maximalen Nitrifikationsrate, dem volumetrischen Wassergehalt, dem Adsorptionskoeffizienten von Ammonium, den Konzentrationen von Ammonium und Nitrat und dem maximalen Verhältnis von Nitrat zu Ammonium. Zusätzlich wird die Nitrifikation reduziert, wenn Bodenwassergehalt und -temperatur außerhalb eines optimalen Bereichs liegen. Mithilfe derselben Parameter wird analog dazu die Harnstoff-Hydrolyse aus der Harnstoff-Abbaurrate und dem Harnstoff-Adsorptionskoeffizienten berechnet. Die Denitrifikation hängt von der Denitrifikationsrate, der Nitratkonzentration im Boden und der Halbsättigungskonstante ab. Auch hier können Bodenwassergehalt und Temperatur eine Reduktion der Denitrifikation bewirken, jedoch im Vergleich zur Nitrifikation in gegensätzlicher Weise. Die Mineralisierung von Kohlenstoff und Stickstoff wird aus der jeweiligen abgebauten organischen Substanz berechnet. Hierbei werden wieder Bodenwassergehalt und Temperatur berücksichtigt. Die Mengen von abgebautem Stickstoff und Kohlenstoff hängen eng zusammen.

Düngung bewirkt in Expert-N 5.0 zunächst eine Erhöhung von Nitrat, Ammonium und Harnstoff auf der Bodenoberfläche. Diese ausgebrachten Stickstoffverbindungen

werden dann im weiteren Verlauf in tiefere Bodenschichten transportiert, wo sie umgewandelt und von den Pflanzen aufgenommen werden können.

Als Feldfrucht wurde in jedem Jahr der dreißigjährigen Simulationsperiode Winterweizen festgelegt. Des Weiteren wurde Expert-N zwischen jährlicher Ernte und neuer Aussaat nicht neu initialisiert. Die Simulation beinhaltet auch, dass bei der Ernte 10 % der oberirdischen Biomasse sowie die Wurzelbiomasse nicht entfernt wurde. Als Düngezeitpunkte waren in jedem Jahr der 1. März (130 kgN ha^{-1}), der 15. April (52 kgN ha^{-1}) und der 1. Juni (26 kgN ha^{-1}) vorgegeben. Saat- und Erntedatum waren in jedem Jahr der 1. Oktober und der 1. August. Als Saattiefe wurde 4 cm angenommen, die Pflanzdichte lag bei 400 Pflanzen pro m^2 . Die Länge der Photoperiode und Vernalisation wurde bei der Simulation des Pflanzenwachstums berücksichtigt, die maximale Durchwurzelungstiefe war nur durch die Tiefe des Bodenprofils beschränkt.

Als Startwert für den Bodenwassergehalt wurde in jeder Schicht die Hälfte des pflanzenverfügbaren Wassers angenommen (also der Mittelwert zwischen den Wassergehalten bei Feldkapazität und beim permanenten Welkepunkt). In der obersten Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm wurde der Nitrat- und Ammoniumgehalt auf 30 kg ha^{-1} gesetzt, zwischen 30 und 120 cm Tiefe auf 20 kg ha^{-1} , von 120 cm bis 200 cm Tiefe auf 5 kg ha^{-1} , und darunter auf 1 kg ha^{-1} .

In den Studien von Hoffmann u. a. (2016), Van Bussel u. a. (2016) und Zhao u. a. (2016) wurden häufig bestimmte Gitterpunkte mithilfe geschichteter Zufallsstichproben ausgewählt. Im Allgemeinen wird für die Generierung geschichteter Zufallsstichproben die Grundgesamtheit gemäß bestimmter Kriterien in sogenannte Schichten aufgeteilt. Danach wird aus jeder Schicht eine einfache Stichprobe entnommen. Für die Einteilung in Schichten der Gitterpunkte in Nordrhein-Westfalen dienen die geographische Lage, die Bodentiefe und die verschiedenen Wetterdaten als mögliche Kriterien.

4.4.2 Generierung der verschiedenen Modellgitter

Um die unterschiedlichen Modellgitter zu generieren, wurden Wetter- und Bodendaten mit verschiedenen horizontalen Auflösungen bereitgestellt. Die Lage von Nordrhein-Westfalen innerhalb Deutschlands und die Anordnung der einzelnen Gitter zeigt Abbildung 4.7. Die horizontalen Auflösungen und die maximale Anzahl der durchgeführten Simulationen sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Hier wird deutlich, dass bei den Simulationen mit geringeren Auflösungen der simulierte Bereich teilweise deutlich über die Grenzen des Bundeslandes hinausgeht. Des Weiteren wurde in den Simulationen von Phase 1 (Untersuchung der Skalierung der Wetterdaten) bei der Auflösung von $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ die

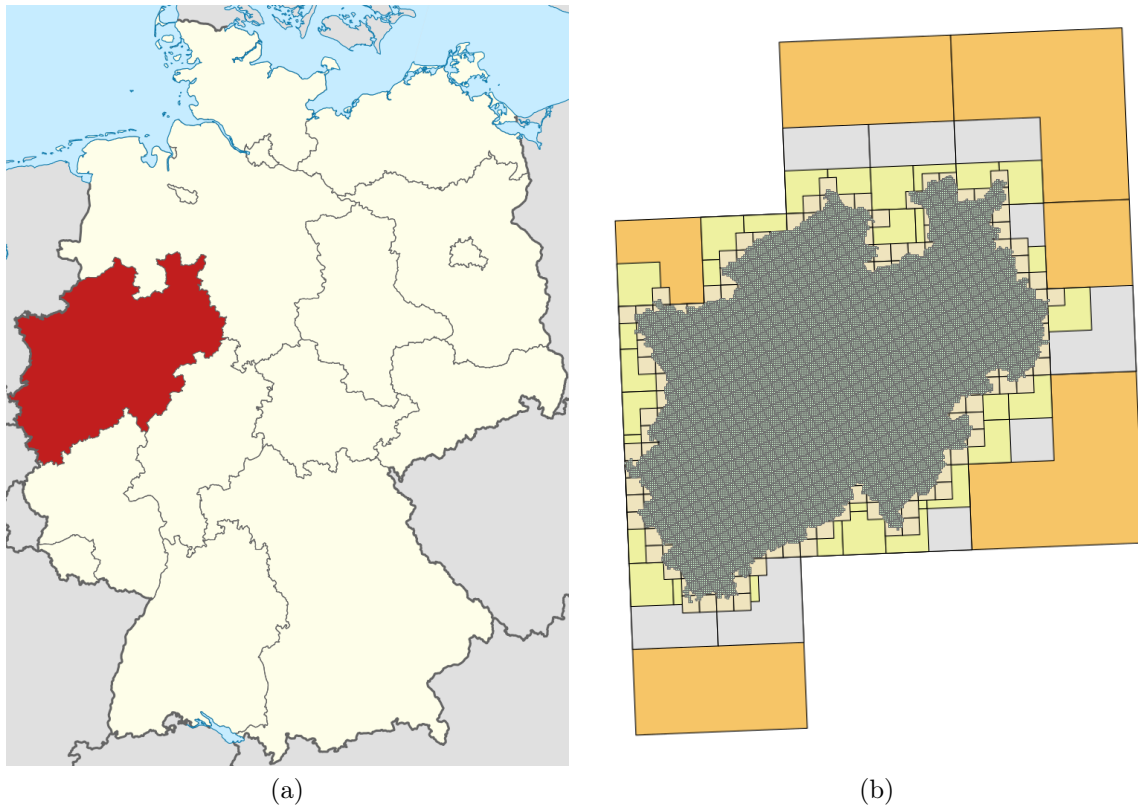


Abbildung 4.7: (a) Lage von Nordrhein-Westfalen innerhalb Deutschlands (Lizenz: CC BY-SA 3.0, Urheber: TUBS) und (b) Aufteilung von Nordrhein-Westfalen in die einzelnen Gitter.

Tabelle 4.8: Räumliche Auflösungen und maximale Anzahl der zu simulierenden Gitterpunkte für die 30-jährigen AgMIP- und MACSUR-Simulationen von Nordrhein-Westfalen. Die angegebenen Farben beziehen sich auf Abbildung 4.7b.

Auflösung	Anzahl der Gitterpunkte	Farbe
1 km × 1 km	34078 (Phase 1) / 34168 (Phase 2)	dunkelgrau
10 km × 10 km	410	hellorange
25 km × 25 km	80	gelb
50 km × 50 km	24	hellgrau
100 km × 100 km	9	orange
34 098 km ²	1	-

reale Fläche von Nordrhein-Westfalen (34 098 km²) etwas unterschritten, während in den darauffolgenden Phasen 2 und 3 (Untersuchung der Skalierung der Bodendaten und des Managements) eine etwas größere Fläche simuliert wurde. Die für dieses Experiment angenommene Landnutzung (Winterweizen auf jedem Gitterpunkt) unterstreicht die hypothetische Natur dieses Experiments.

Einerseits wurden Simulationen durchgeführt, bei denen die Auflösungen von Wetter- und Bodendaten gleich waren, andererseits auch solche, bei denen mit nur einem durchschnittlichen Boden und hochaufgelösten Wetterdaten oder mit nur einem durchschnittlichen Wetter und höher aufgelösten Bodendaten simuliert wurde. Bei Letzterem konnte aufgrund der Tatsache, dass an unterschiedlichen Standorten gleich definierte Böden vorkommen, trotz der Auflösung von 1 km × 1 km die Anzahl der zu simulierenden Gitterpunkte auf ca. 8000 reduziert werden. Die Simulationen mit der höchsten Auflösung wurden auf einem Hochleistungsrechner (Architektur: x86_64, 64 reale bzw. 128 virtuelle Prozessoren, Speicher ca. 256 Gigabytes, Betriebssystem: Suse Linux Enterprise Server 11) durchgeführt und dauerten ca. 2 - 3 Wochen. Bei einer Auflösung von 10 km × 10 km und geringer konnten die Simulationen auf einem einzigen PC (Architektur: i386_64bit, 4 Hauptprozessoren, Speicher ca. 8 Gigabytes, Betriebssystem: Ubuntu 12.04) mit einer Simulationsdauer von maximal 2 Tagen durchgeführt werden.

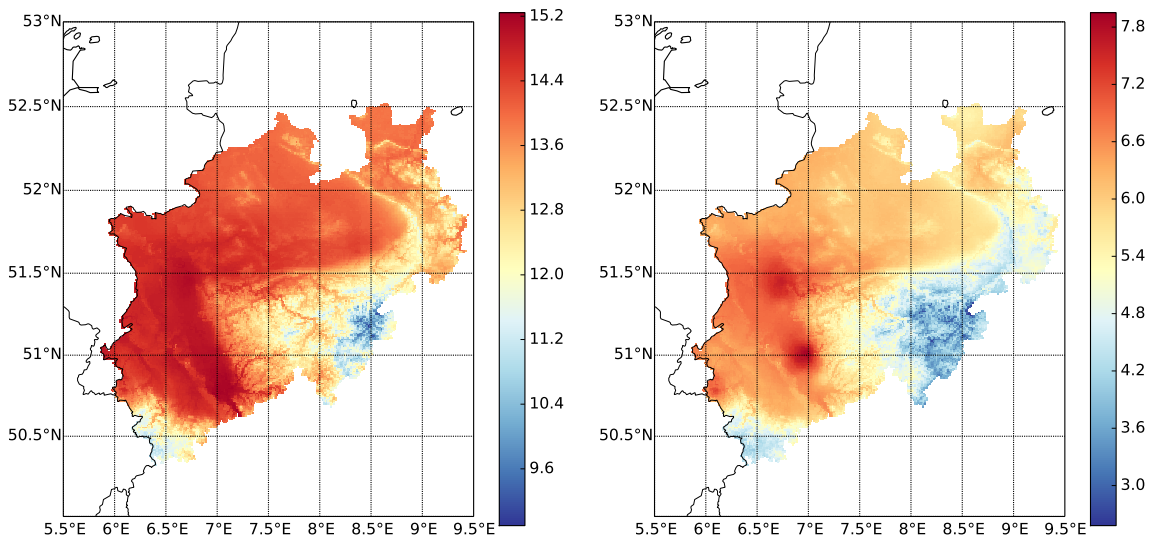
In der anschließenden Phase 3 wurde schließlich noch das Management variiert. Im ersten Schritt wurden Saat- und Düngedaten für jede Gitterzelle und jedes Jahr einzeln vorgegeben. Die Düngermenge wurde jedoch wie in den vorherigen Phasen beibehalten. Geerntet wurde sobald die vollständige Reife der Pflanzen simuliert war oder spätestens an den vorgegebenen Erntedaten. Im zweiten Schritt wurden zusätzlich Reifeklassen (früh, mittel und spät) eingeführt. Dadurch wurde je nach Gitterzelle eine langsamere oder schnellere phänologische Entwicklung simuliert. Ansonsten galten dieselben Vorgaben wie in Schritt 1. Auch die Simulationen des dritten Schrittes wurden wie im ersten Schritt aufgebaut. Hier wurden allerdings die Düngemengen im Vergleich zu den Grundmengen jeweils um 25 %, 50 % und 75 % verringert.

Im Folgenden werden die Wetter- und Bodendaten sowie die Ergebnisse der Expert-N-Simulationen (Abschnitt 5.3) aus den Phasen 1 und 2 dargestellt.

4.4.2.1 Das Wetter in Nordrhein-Westfalen

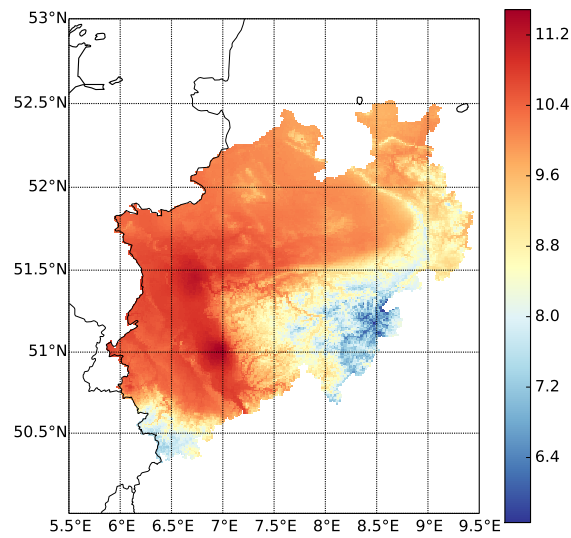
Die dreißigjährigen Zeitreihen der Wetterdaten der einzelnen Gitterpunkte wurden je nach Variable unterschiedlich bestimmt. Temperatur, Sonnenscheindauer, Niederschlag und Windgeschwindigkeit von 280 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes wur-

4.4 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen



(a) Maximale Tagestemperatur [°C]

(b) Minimale Tagestemperatur [°C]



(c) Mittlere Tagestemperatur [°C]

Abbildung 4.8: Dreißigjährige Mittelwerte der Temperaturdaten von Nordrhein-Westfalen in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung: (a) Maximale Tagestemperatur, (b) Minimale Tagestemperatur, und (c) Mittlere Tagestemperatur

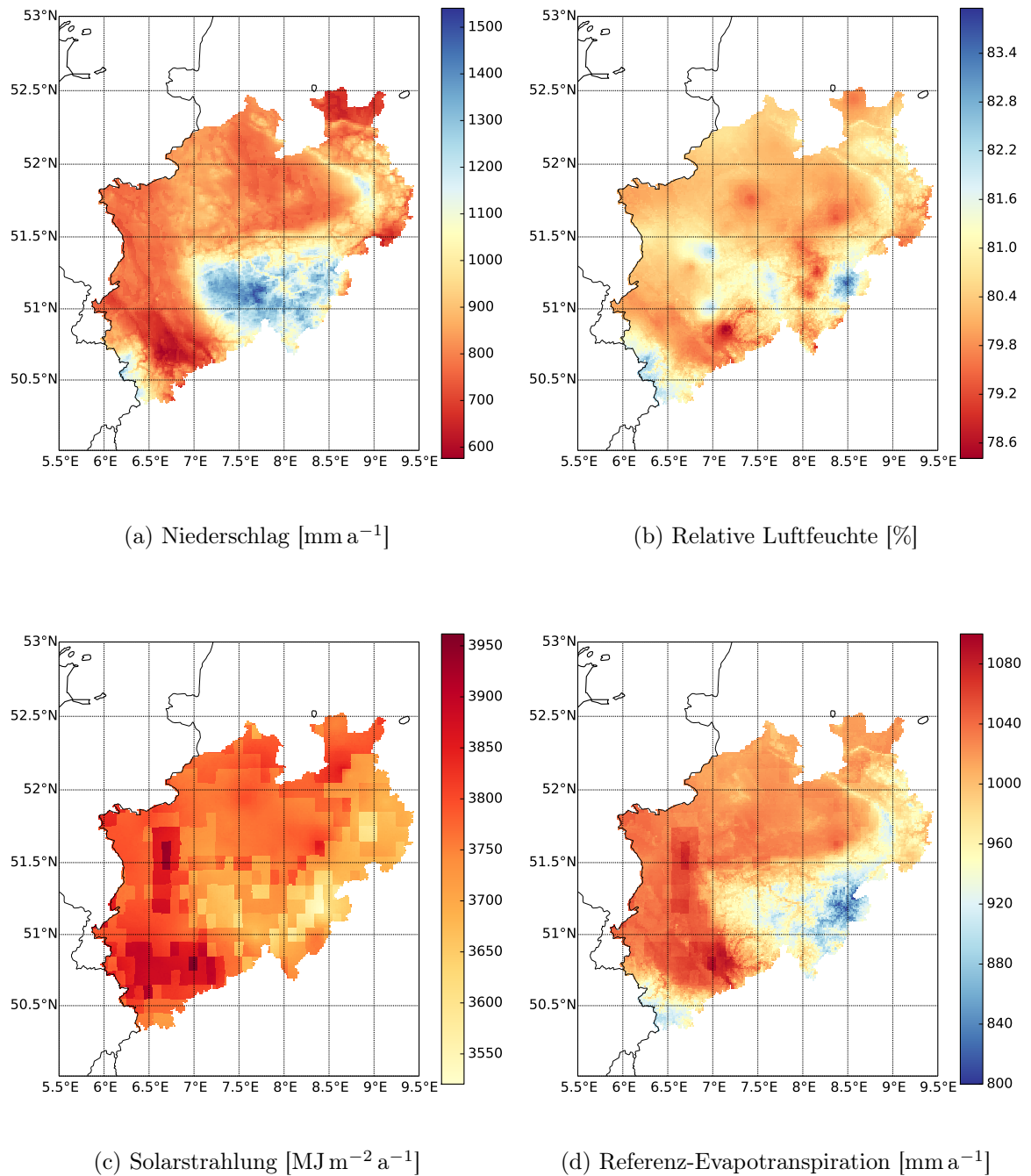


Abbildung 4.9: Dreißigjährige Mittelwerte der Wetterdaten von Nordrhein-Westfalen in $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Auflösung: (a) Jahresniederschlagssumme, (b) Relative Luftfeuchte, (c) Jahressumme der einfallenden Solarstrahlung, und (d) Jahressumme der Referenz-Evapotranspiration

den in täglicher Auflösung verwendet (Van Bussel u. a. 2016). Die Temperaturen (Tagesminimum und -maximum) errechneten sich aus den Temperaturdaten der Wetterstationen, die mit monatlichen Temperaturmitteln in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung kombiniert wurden (Van Bussel u. a. 2016). Die Solarstrahlung wurde mit der Ångström-Prescott-Formel (Prescott 1940) aus der täglichen Sonnenscheindauer der Wetterstationen und aus Satellitendaten in $7\text{ km} \times 11\text{ km}$ Auflösung berechnet. Die Windgeschwindigkeit ist für alle Gitterpunkte identisch (Mittelwert der Windgeschwindigkeiten an den Wetterstationen), da keine räumlich hochaufgelösten Monatswerte für die Aggregation zur Verfügung standen. Die relative Luftfeuchte wurde unter Verwendung der mittleren Tagestemperatur und mit folgender Annahme berechnet: die tägliche Taupunkttemperatur ist $0,5\text{ °C}$ kleiner als die Tagesminimaltemperatur (Allen u. a. 1998). Die hochaufgelösten Niederschlagsdaten stammen direkt vom Deutschen Wetterdienst (Van Bussel u. a. 2016). Die Wetterdaten mit räumlich niedrigeren Auflösungen wurden durch flächige Mittelungen über die Wetterdaten mit $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung bestimmt (Hoffmann u. a. 2016).

In Abbildung 4.8 sind die dreißigjährigen Mittel der Temperaturen von Nordrhein-Westfalen in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung dargestellt. Die gemittelten Tagesmaxima (Abbildung 4.8a) liegen im Bereich von $8,9\text{ °C}$ bis $15,2\text{ °C}$. Dabei treten die höchsten Temperaturen entlang des Rheins auf. In den Mittelgebirgsregionen Sauerland, Bergisches Land, Rothaargebirge und Eifel sind die Tagesmaxima der Temperaturen am niedrigsten. Deutlich zu erkennen sind ebenfalls die Flusstäler innerhalb der Mittelgebirge, die durch höhere Temperaturen im Vergleich zur Umgebung gekennzeichnet sind. Niedrigere Tageshöchsttemperaturen im Vergleich zur Umgebung kommen im Teutoburger Wald, der sich als Ausläufer des Sauerlandes von Südosten nach Nordwesten erstreckt, und im Wiehengebirge auf $52,25^\circ$ nördlicher Breite im Nordosten von Nordrhein-Westfalen vor. Die dreißigjährigen Mittel der Tagesminima (Abbildung 4.8b) bewegen sich zwischen $2,6\text{ °C}$ und $8,0\text{ °C}$. Grundsätzlich ist auch hier die geographische Verteilung ähnlich wie bei den Tagesmaxima der Temperaturen, jedoch ist der Unterschied zwischen Stadt und Umland ausgeprägter: die Temperaturminima, die im Allgemeinen nachts auftreten, sind in Köln und in den Städten des westlichen Ruhrgebiets deutlich höher als im jeweiligen Umland. Diese verminderte, nächtliche Abkühlung in den Städten (vgl. Upmanis u. a. 1998) ist auf die höhere Wärmespeicherfähigkeit von Stein im Vergleich zu Vegetation zurückzuführen. Die Tagesmittelwerte der Temperatur (Abbildung 4.8c), welche als Mittelwerte von Tagesmaximal- und Tagesminimaltemperatur berechnet wurden, liegen zwischen $5,7\text{ °C}$ und $11,5\text{ °C}$. Hier lässt sich dieselbe Verteilung wie bei den Maximal-

und Minimaltemperaturen beobachten, nur ist der Unterschied zwischen Stadt und Umland nicht so deutlich, da dieser bei der Betrachtung der Tageshöchsttemperatur weniger stark hervortritt.

Die dreißigjährigen Mittel von Niederschlag, relativer Luftfeuchte, Solarstrahlung und Referenz-Evapotranspiration sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Die geographische Verteilung des Jahresniederschlags (Abbildung 4.9a) ist jener der Temperatur sehr ähnlich: die jährlichen Niederschlagssummen sind in den Mittelgebirgen hoch (maximal $1540,7 \text{ mm a}^{-1}$), im Tiefland niedrig (minimal $575,9 \text{ mm a}^{-1}$). Die Gebiete mit dem wenigsten Niederschlag befinden sich in der Niederrheinischen Bucht im Süden, in der Warburger Börde im südlichen Osten, und nördlich des Wiehengebirges im Nordosten des Bundeslandes. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte (Abbildung 4.9b) liegt zwischen 78,4 % und 84,0 %. In der Karte sind immer noch einzelne Gebirge, z. B. Eifel, Teutoburger Wald und Wiehengebirge zu erkennen, aber die geographische Verteilung ist hier nicht so deutlich wie bei Temperatur oder Niederschlag. Statt dessen gibt es kreisförmige Gebiete, die sich durch eine höhere oder niedrigere Luftfeuchte im Vergleich der Umgebung auszeichnen. Die höchste, gemittelte relative Luftfeuchte tritt im östlichen Sauerland auf, die Niedrigste nordöstlich von Bonn. Die Jahressumme der Solarstrahlung (Abbildung 4.9c) beträgt maximal $3961,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und minimal $3520,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Die Strahlungsdaten sind räumlich geringer aufgelöst als die restlichen Wetterdaten, ungefähr auf $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Im Südosten und Osten von Nordrhein-Westfalen ist die Solarstrahlung geringer als im Südwesten und Westen. Am Höchsten ist die jährliche Summe der Solarstrahlung in Bonn und nordwestlich des Ruhrgebiets. Die Referenz-Evapotranspiration (Abbildung 4.9d) wurde aus den vorhandenen Wetterdaten berechnet und kann als potentielle Evapotranspiration betrachtet werden. Ihre jährliche Summe liegt je nach Gitterpunkt zwischen etwa 800 mm a^{-1} und 1100 mm a^{-1} . Die höchsten Werte wurden dort berechnet, wo Strahlung und Temperatur hoch und die relative Luftfeuchte niedrig waren. Bedingt durch die niedrigeren Temperaturen, die geringere Solarstrahlung und die teilweise höhere relative Luftfeuchte, ist die Referenz-Evapotranspiration in den Mittelgebirgen, insbesondere im östlichen Sauerland, niedrig. Die geringere geographische Auflösung der Strahlungsdaten spiegelt sich auch in der Darstellung der Referenz-Evapotranspiration wider.

Da die Windgeschwindigkeit auf jedem Gitterpunkt als gleich angenommen wurde, wird an dieser Stelle keine Karte gezeigt. Im dreißigjährigen Mittel beträgt die Windgeschwindigkeit $2,56 \text{ m s}^{-1}$. Die Verwendung eines durchschnittlichen Windes ist jedoch ein Nachteil bei der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Penman-

Monteith (vgl. Gleichung 4.7), da sich die tatsächlichen Windgeschwindigkeiten innerhalb von Nordrhein-Westfalen deutlich unterscheiden können und diese in den aerodynamischen Term der Gleichung als Faktor mit eingehen.

Die über das Bundesland gemittelten Jahreswerte der Wetterdaten und das für die Studie verwendete Durchschnittswetter sind als Zeitreihe in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Solarstrahlung (Abbildung 4.10a) beider Zeitreihen ist sehr ähnlich. Das Maximum und das Minimum der über Nordrhein-Westfalen gemittelten Jahressummen der Strahlung liegen bei $4211,14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 2003, und bei $3470,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 1998. Die Extrema der durchschnittlichen Solarstrahlung von $4211,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und $3485,16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ traten ebenfalls in diesen Jahren auf. Der Unterschied in der Strahlungssumme kann von einem Jahr auf das nächste bis zu $600 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ betragen. Auch die jährlichen Niederschlagssummen (Abbildung 4.10b) sind sehr variabel. Das trockenste Jahr war 1991 ($729,24 \text{ mm a}^{-1}$ bzw. $655,34 \text{ mm a}^{-1}$), das feuchteste 2007 ($1120,58 \text{ mm a}^{-1}$ bzw. $1022,51 \text{ mm a}^{-1}$). Die über alle Gitterpunkte gemittelte Jahressumme des Niederschlags liegt bis zu 100 mm a^{-1} über der Niederschlagssumme des Durchschnittswetters. Auffällig ist auch, dass das Jahr mit der maximalen Solarstrahlung sehr wenig Niederschlag aufweist, das Jahr mit der geringsten Solarstrahlung vergleichsweise viel. Ein ähnlicher Zusammenhang mit den jährlichen Strahlungssummen ist ebenso in der Zeitreihe der relativen Luftfeuchte zu beobachten (Abbildung 4.10c). Hier liegen wie bei der Solarstrahlung beide Zeitreihen enger beieinander. Die im Durchschnitt geringste relative Luftfeuchte von $78,4 \%$ bzw. $78,2 \%$ trat im Jahr 2003 auf. Bei der flächigen Mittelung war die relative Luftfeuchte im Jahr 1988 maximal ($82,0 \%$), beim Durchschnittswetter im Jahr 1998 ($81,7 \%$). Die durchschnittlichen Tageslufttemperaturen (Abbildung 4.10d) sind in allen drei dargestellten Fällen etwa $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ geringer als die über die Fläche gemittelten Temperaturen. Das kälteste Jahr war 1996, in dem die Tagesmaximaltemperatur im Mittel knapp $12 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug, die mittlere Tagestemperatur etwas weniger als $8 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Tagesminimaltemperatur ungefähr $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei Betrachtung der Tagesmaxima der Temperatur weist das Jahr 2011 die höchsten Werte von $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $14,7 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, wobei im Jahr 2003 ähnlich hohe Werte vorliegen. Die Tagesdurchschnitts- und die Tagesminimaltemperatur waren wiederum im Jahr 2000 am Höchsten: $10,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $10,3 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $7,1 \text{ }^\circ\text{C}$ und $6,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei der Windgeschwindigkeit (Abbildung 4.10e) gibt es keinen Unterschied zwischen den zwei Zeitreihen, da sie – wie oben schon beschrieben – auf jeden Gitterpunkt als identisch angenommen wurde. Der jährliche Durchschnitt schwankt zwischen $2,35 \text{ m s}^{-1}$ und $2,76 \text{ m s}^{-1}$, von einem Jahr auf das andere um maximal $0,3 \text{ m s}^{-1}$. Die Zeitreihen der Referenz-Evapotranspiration

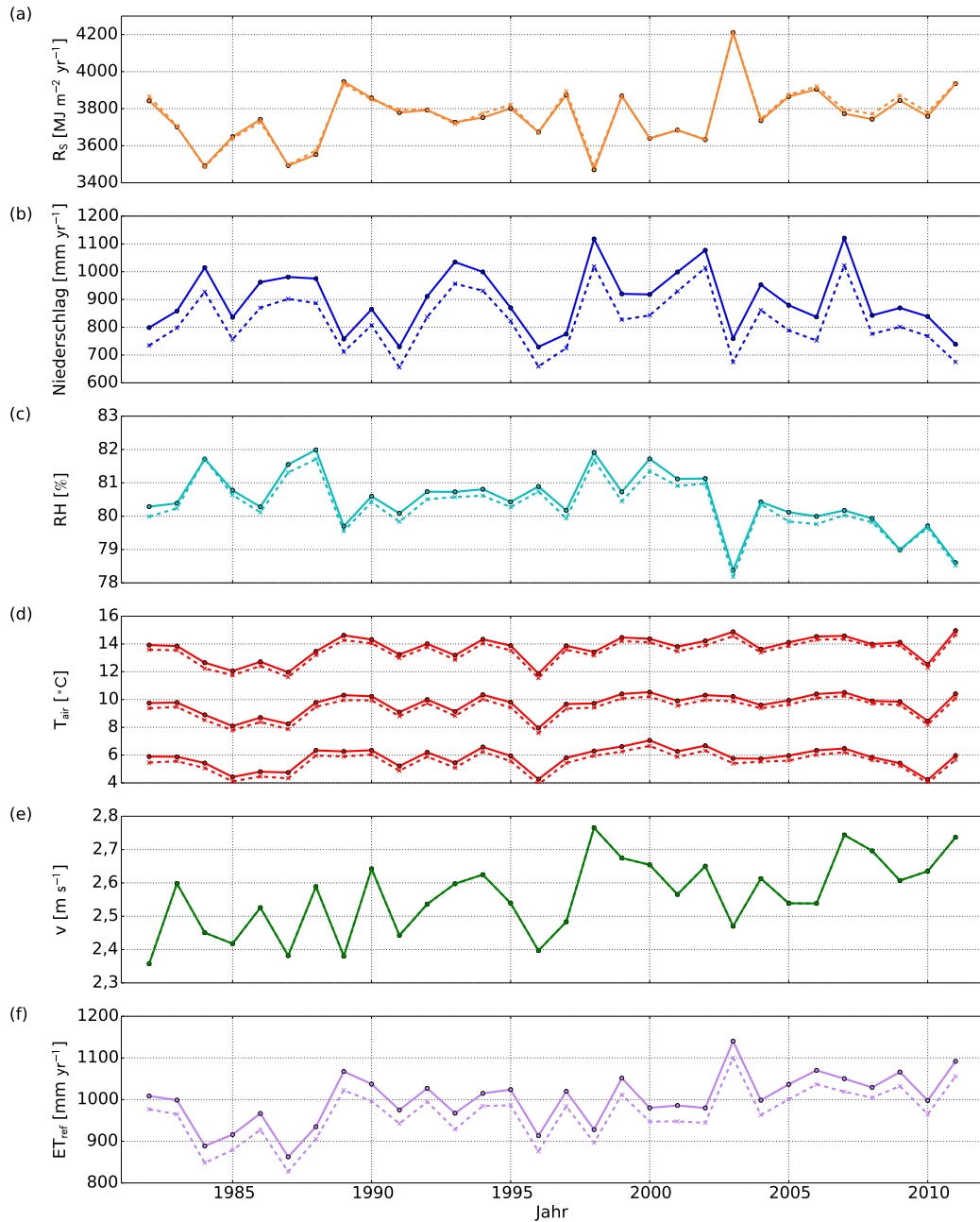


Abbildung 4.10: Zeitreihe der jährlichen Wetterdaten von Nordrhein-Westfalen zwischen 1982 und 2011. Dargestellt sind Mittelwerte über alle 34168 Gitterpunkte (durchgezogene Linie mit Punkten) und das zur Verfügung gestellte Durchschnittswetter (gestrichelte Linie mit x-Markern): (a) Solarstrahlung R_S [$\text{MJ m}^{-2} \text{a}^{-1}$] (orange), (b) Niederschlag [mm a^{-1}] (blau), (c) Relative Luftfeuchte RH [%] (hellblau), (d) maximale, mittlere, und minimale Tageslufttemperatur T_{air} [$^{\circ}\text{C}$] (rot), (e) Windgeschwindigkeit v [m s^{-1}] (grün), und (f) Referenz-Evapotranspiration ET_{ref} [mm a^{-1}] (violett).

(Abbildung 4.10f) verlaufen ähnlich wie die der Strahlung und teilweise gegenläufig zu den Zeitreihen der relativen Luftfeuchte. Die zur Verfügung gestellte, durchschnittliche Referenz-Evapotranspiration ist in etwa 50 mm a^{-1} niedriger als der über die Fläche gemittelte Jahreswert. Das Jahr 2003 weist bedingt durch die hohe Strahlung und die niedrige relative Luftfeuchte die höchste Referenz-Evapotranspiration von 1140 mm a^{-1} bzw. 1100 mm a^{-1} auf. Die geringste jährliche Referenz-Evapotranspiration wurde für das Jahr 1987 berechnet: 863 mm a^{-1} bzw. 827 mm a^{-1} . Ein Zusammenhang zwischen einerseits Referenz-Evapotranspiration und andererseits Temperaturen oder Windgeschwindigkeit ist nicht offensichtlich.

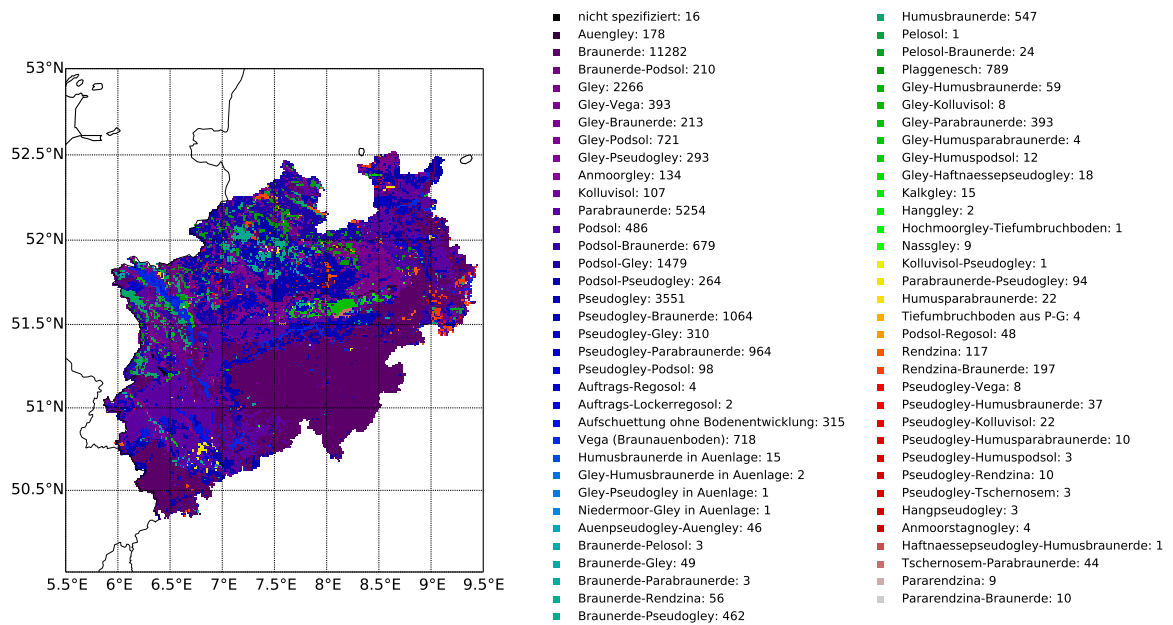
4.4.2.2 Die Böden in Nordrhein-Westfalen

Die Bodendaten für die Simulationen in Phase 1 stammen aus der SOTOR-BK3 Datenbank. Die obersten 30 cm wurden als Pflughorizont separiert (Van Bussel u. a. 2016).

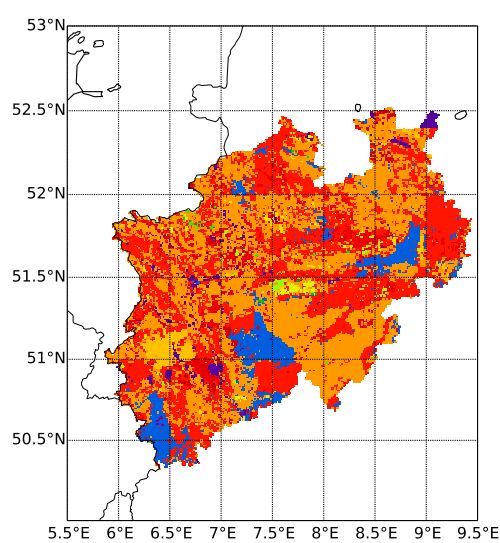
Für die Simulationen in Phase 2 wurden Bodentypen in $0,3 \text{ km} \times 0,3 \text{ km}$ Auflösung aus einer Bodenkarte des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen (GDNRW 2004) extrahiert. Anhand dieser Daten wurde für jeden Gitterpunkt in allen räumlichen Auflösungen der am häufigsten vorkommende Bodentyp ermittelt. Daraus erfolgte wiederum die Zuordnung vorgegebener Bodenprofile mit bestimmten physikalischen Eigenschaften auf die einzelnen Gitterpunkte. (Hoffmann u. a. 2016; Zhao u. a. 2016).

Als Durchschnittsboden in Nordrhein-Westfalen wurde eine lehmig-schluffige Parabraunerde definiert, die mit zunehmender Tiefe stark sandig wird. Tabelle 4.9 zeigt die vorgegebenen Bodendaten des schwach-sauren bis neutralen Bodens (pH-Wert zwischen 6,2 und 7,0). Kies wurde nur in der untersten Bodenschicht mit einem Anteil von 70 % des Gesamtbodengewichtes angenommen. Die Lagerungsdichte lag in allen Schichten bei $1,4 \text{ g cm}^{-3}$.

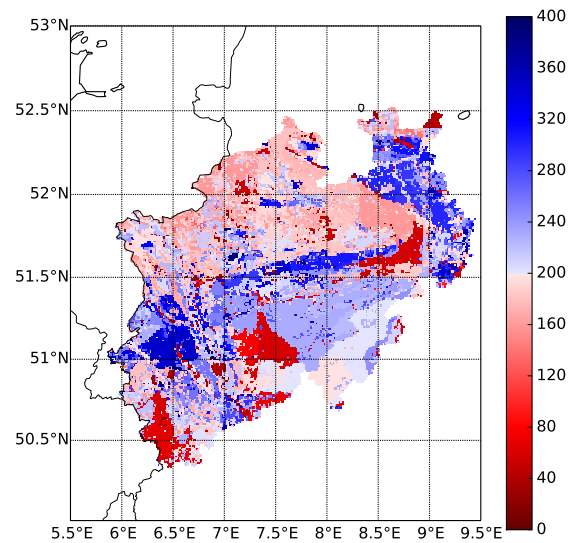
Abbildung 4.11 zeigt die Bodentypen, die Bodentiefen und den im gesamten Bodenprofil verfügbaren Wassergehalt auf einem $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ -Gitter in Nordrhein-Westfalen. Insgesamt wurden 68 Bodentypen (Abbildung 4.11a) unterschieden. Am häufigsten kommen die Typen Braunerde (33,0 %), Parabraunerde (15,3 %), Pseudogley (10,4 %), Gley (6,6 %), Podsol-Gley (4,3 %) und Pseudogley-Braunerde (3,1 %) vor. Vor allem das Sauerland, Bergische Land und Rothaargebirge im Südosten sowie die Eifel im Südwesten des Bundeslandes sind durch Braunerde charakterisiert. Die Bodentypen im restlichen Teil von Nordrhein-Westfalen sind deutlich inhomogener verteilt. In der Niederrheinischen Bucht und im Weserbergland ist Parabraunerde der vorherrschende Bodentyp, während im Norden viel Gley vorkommt. Außer in den Mittelgebirgen



(a) Bodentypen



(b) Bodentiefe [cm]



(c) Verfügbarer Wassergehalt [mm]

Abbildung 4.11: Bodendaten von Nordrhein-Westfalen in $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Auflösung: (a) Bodentypen mit Anzahl der jeweiligen Gitterpunkte, (b) Tiefe des Bodens, und (c) Verfügbarer Wassergehalt im gesamten Bodenprofil, schichtweise berechnet aus der Differenz der Wassergehalte bei Feldkapazität und beim permanentem Welkepunkt.

4.4 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen

Tabelle 4.9: Durchschnittliche Bodendaten von Nordrhein-Westfalen, aufgeteilt in vier übereinanderliegende Bodenschichten. θ_{sat} , θ_{fc} , θ_{wp} , und θ_{res} sind die Wassergehalte bei Sättigung, bei Feldkapazität, beim permanentem Welkepunkt und der residuale Wassergehalt. C_{org} ist der Gehalt des organisch gebundenen Kohlenstoffs und C:N gibt das Verhältnis von Kohlenstoff- zu Stickstoffmenge im Boden an.

	Dicke [cm]	Ton	Schluff [%]	Sand	θ_{sat}	θ_{fc}	θ_{wp}	θ_{res}	C_{org} [%]	C:N [-]	pH [-]
						[cm ³ cm ⁻³]					
1	30	24	60	16	0,45	0,36	0,17	0,085	2,76	17,2	6,2
2	90	24	60	16	0,45	0,36	0,17	0,085	0,38	6,4	6,6
3	80	14	75	11	0,44	0,37	0,13	0,065	0,27	6,9	6,8
4	30	3	7	90	0,11	0,04	0,01	0,005	0,25	6,9	7,0

sind Pseudogley, Podsol-Gley, Pseudogley-Braunerde und Pseudogley-Parabraunerde stark vertreten. Vor allem im Norden und Nordosten kommen Rendzina- und Rendzina-Braunerde-Böden vor. Ebenfalls im Norden (südlich und westlich von Osnabrück) sind knapp 800 Gitterpunkte durch Plaggenesch charakterisiert.

Die Tiefe der Bodenprofile (Abbildung 4.11b) reicht von 10 cm bis 230 cm. An den meisten Gitterpunkten reicht der Boden bis in 200 cm Tiefe oder darunter. In der Eifel, im Bergischen Land und im Weserbergland gibt es größere Gebiete, in denen die Profiltiefe hingegen nur 50 cm beträgt. Einzelne kleinere Gebiete entlang des Rheins und im Nordosten weisen Bodenprofiltiefen von nur 30 cm und weniger auf.

Der verfügbare Wassergehalt (VWG [mm]) wurde wie folgt berechnet:

$$\text{VWG} = \sum_{i=1}^N (\theta_{fc,i} - \theta_{wp,i}) \Delta d_i, \quad (4.26)$$

wobei N die Anzahl der Bodenschichten, $\theta_{fc,i}$ und $\theta_{wp,i}$ die Wassergehalte bei Feldkapazität und beim permanentem Welkepunkt, und Δd_i die Schichtdicke der jeweiligen Bodenschicht i ist. Der VWG beträgt minimal 8 mm und maximal 412 mm. Da der VWG direkt von der Profiltiefe des Bodens abhängt ist der Zusammenhang zwischen diesen zwei Variablen sehr deutlich: im Allgemeinen sind Gitterpunkte mit einer geringen Profiltiefe durch wenig verfügbares Wasser charakterisiert, Gitterpunkte mit einer großen Profiltiefe durch einen höheren VWG. Es gibt aber auch Ausnahmen: Die größten VWGs treten im Niederrheinischen Tiefland auf, wo die Profiltiefe oftmals nur 180 cm beträgt. Auch im Norden besteht nicht immer ein direkter Zusammenhang zwi-

schen VWG und Profiltiefe. Vielmehr wird hier deutlich, dass v. a. die Bodentypen Parabraunerde und Gley-Parabraunerde viel verfügbares Wasser im Boden bieten.

4.5 Statistische Maße zum Vergleich von Modell und Messung

In dieser Dissertation wurden verschiedene statistische Maße zum Vergleich von Modell und Messung angewendet. Der Index of Agreement (IA, Willmott 1981) berechnet sich wie folgt:

$$\text{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad (4.27)$$

wobei P_i und O_i die Vorhersage (Simulation) und Beobachtung (Messwert) zu einem bestimmten Zeitpunkt i , \bar{O} der Mittelwert aller Beobachtungen, und N die Anzahl der Wertepaare sind. Die Obergrenze des IA liegt bei 1, was genau dann erreicht wird, wenn alle Wertepaare übereinstimmen, also alle P_i und O_i gleich sind. Die untere Grenze des IA ist 0. In diesem Fall sind entweder alle P_i gleich \bar{O} oder P_i und O_i verhalten sich komplett gegenläufig: $P_i - \bar{O} = -(O_i - \bar{O})$.

Für die Berechnung der Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz (NSE, Nash und Sutcliffe 1970) werden die gleichen Variablen verwendet:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}. \quad (4.28)$$

Die NSE kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 einnehmen. Auch hier bedeutet ein Wert von 1, dass Vorhersage und Beobachtung perfekt übereinstimmen, da die Summe im Zähler 0 wird. Wenn die NSE 0 ist, ist die Simulation nur genauso präzise wie der Mittelwert der Messwerte. Somit hat eine negative NSE die Bedeutung, dass die Messwerte besser durch ihren eigenen Mittelwert abgebildet werden können als durch die Vorhersage.

Kapitel 5

Simulationen: Ergebnisse, Vergleich mit Messungen und Diskussion

5.1 Simulation der Lysimeter-Wasserbilanz

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse beschrieben und mit den dazugehörigen Messwerten verglichen. Die detaillierte Beschreibung der Messwerte befindet sich in den entsprechenden Abschnitten von Kapitel 3. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden auch in Heinlein u. a. (2017) veröffentlicht.

5.1.1 Saftfluss und Transpiration

Die modellierten und gemessenen Saftflussraten von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013 sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Ebenso wie die Messwerte (Abschnitt 3.3) zeigen die Saftflusssimulationen von SPASS und CERES ausgeprägte Tagesgänge, die von der Wahl des Evapotranspirationsmoduls abhängen. Die maximalen potentiellen Saftflussraten (nicht abgebildet) im analysierten Zeitraum lagen bei etwa 190 mm h^{-1} (ET_{ASCE} , SPASS), 215 mm h^{-1} (ET_{ASCE} , CERES), 175 mm h^{-1} (ET_{FAO} , SPASS), 185 mm h^{-1} (ET_{FAO} , CERES), 255 mm h^{-1} (ET_{Haude} , SPASS), und 285 mm h^{-1} (ET_{Haude} , CERES). Tagsüber zwischen 14. und 18. August (DOY 226 - 230) 2013 trat in allen SPASS-Simulationen geringer Wasserstress auf (bis zu 19 Zeitpunkte bei ET_{Haude} , SPASS). In diesem Fall war der potentielle Saftfluss höher als der aktuelle. Dies bedeutet, dass die modellierten Pflanzen mehr transpiriert hätten, wenn sie mehr Wasser aus den durchwurzelteten Bodenschichten hätten aufnehmen können. Zu den anderen Zeitpunkten sowie bei den CERES-Simulationen waren die potentiellen und aktuellen Saftflussraten gleich. Der maximale aktuelle Saftfluss der einzelnen Simulatio-

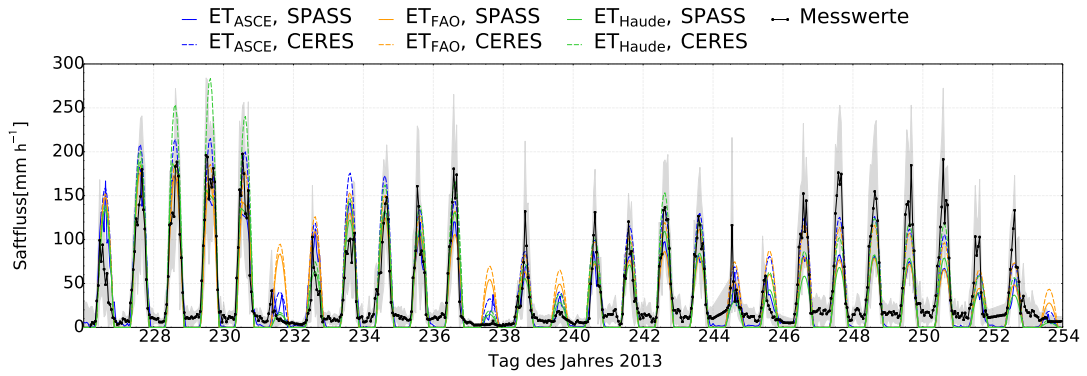


Abbildung 5.1: Zeitreihe der gemessenen und simulierten Saftflussraten von 14. August bis 11. September 2013. Die gemessenen Werte (durchgezogene, schwarze Linie mit Punkten) sind stündliche gemittelte Durchschnittswerte der Saftflussraten [mm h^{-1}] von fünf verschiedenen Maispflanzen auf einem Lysimeter inklusive Standardabweichungen (grau hinterlegt). Simulationen, die auf verschiedene Evapotranspirationsmodule zurückzuführen sind, werden in blau (ET_{ASCE}), gelb (ET_{FAO}) und grün (ET_{Haude}) abgebildet, die durchgezogenen (SPASS) und gestrichelten (CERES) Linien stellen das ausgewählte Pflanzenmodell dar.

nen betrug 182 mm h^{-1} (ET_{ASCE} , SPASS), 215 mm h^{-1} (ET_{ASCE} , CERES), 175 mm h^{-1} (ET_{FAO} , SPASS), 185 mm h^{-1} (ET_{FAO} , CERES), 190 mm h^{-1} (ET_{Haude} , SPASS), und 285 mm h^{-1} (ET_{Haude} , CERES).

An Regentagen, wenn die maximale Tagestemperatur und die Strahlung niedrig waren, lagen die Saftflussraten zwischen 20 und 100 mm h^{-1} . In den meisten Nächten wurde mit keiner der gewählten Modellkonfigurationen Saftfluss simuliert. Nur wenn ET_{ASCE} mit SPASS kombiniert wurde, erreichte der modellierte Saftfluss in 14 Nächten innerhalb der Messperiode bis zu 5 mm h^{-1} .

Die Tagesgangsimulationen und die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der Modelle werden in Abbildung 5.2 verdeutlicht, welche gemittelte Tagesgänge der modellierten und gemessenen Transpiration zwischen 14. August (DOY 226) und 11. September 2013 (DOY 254) zeigt. Abbildung 5.2a zeigt die gemittelte Lysimeter-Transpiration aller Tage. Das Tagesmaximum der gemessenen Transpiration beträgt $0,058 \text{ mm h}^{-1}$, die CERES-Simulationen zeigen Tagesmaxima von etwa $0,066 \text{ mm h}^{-1}$, und die SPASS-Simulationen haben Maxima um ca. $0,049 \text{ mm h}^{-1}$. Im Mittel ist der Einfluss des Pflanzenmodells auf die modellierte Transpiration höher als der Einfluss des gewählten Evapotranspirationsmoduls. Dies gilt auch, wenn nur die regenfreien Tage (Abbildung 5.2c) berücksichtigt werden. Dann sind die Tagesmaxima der Transpiration

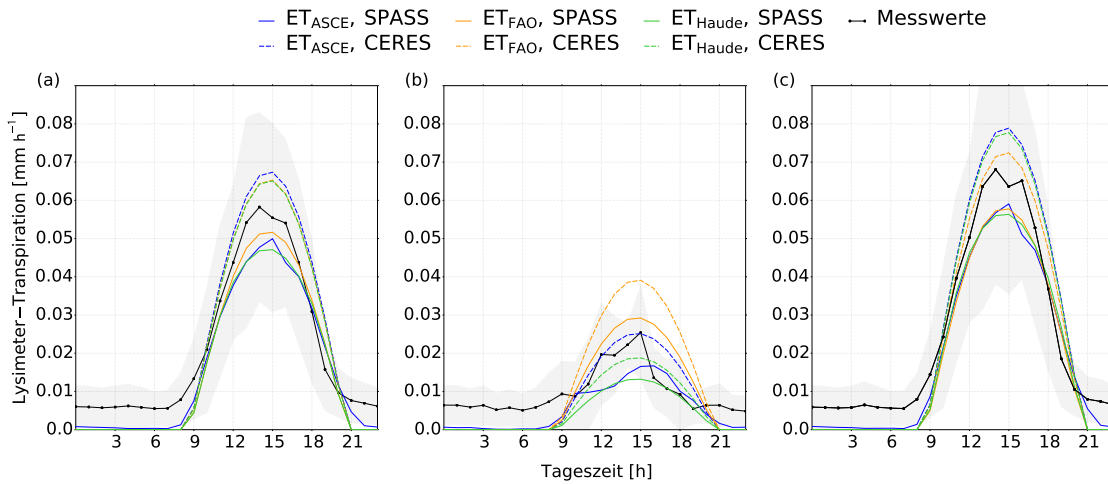


Abbildung 5.2: Gemittelte Tagesgänge der gemessenen und simulierten Lysimeter-Transpiration zwischen 14. August und 11. September 2013: (a) alle Tage, (b) Regentage (19., 25., 27. August und 8. - 10. September 2013), (c) regenfreie Tage. Die gemessenen Werte (durchgezogene, schwarze Linie mit Punkten) sind stündliche gemittelte Transpirationssummen [mm h^{-1}] von fünf verschiedenen Maispflanzen auf einem Lysimeter inklusive Standardabweichungen (grau hinterlegt). Simulationen, die auf verschiedene Evapotranspirationsmodule zurückzuführen sind, werden in blau (ET_{ASCE}), gelb (ET_{FAO}) und grün (ET_{Haude}) abgebildet, die durchgezogenen (SPASS) und gestrichelten (CERES) Linien stellen das ausgewählte Pflanzenmodell dar.

im Vergleich zu Abbildung 5.2a allerdings zwischen $0,006 \text{ mm h}^{-1}$ und $0,012 \text{ mm h}^{-1}$ höher. An Regentagen (Abbildung 5.2b) erreicht die gemessene Transpiration durchschnittlich maximal $0,025 \text{ mm h}^{-1}$ bei einer geringen Tagesamplitude. Hier wird der Einfluss des Evapotranspirationsmoduls auf das Modellverhalten deutlicher. Die ET_{FAO} -Simulationen haben Maxima von $0,029 \text{ mm h}^{-1}$ (SPASS) und $0,039 \text{ mm h}^{-1}$ (CERES), die ET_{ASCE} -Simulationen von $0,017 \text{ mm h}^{-1}$ (SPASS) und $0,025 \text{ mm h}^{-1}$ (CERES), und die ET_{Haude} -Simulationen von $0,013 \text{ mm h}^{-1}$ (SPASS) und $0,019 \text{ mm h}^{-1}$ (CERES).

Im Allgemeinen sind die Simulationen in Einklang mit den Messungen. Jedoch war der simulierte Saftfluss an den meisten Regentagen höher und nachts niedriger als der Gemessene. Zwischen 3. (DOY 246) und 10. September (DOY 253) unterschätzen alle Simulationen die Messwerte, die SPASS-Simulationen deutlicher als die CERES-Simulationen. Tabelle 5.1 zeigt die Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessenem und simuliertem Saftfluss. Im Ganzen wurden 672 Zeitpunkte (stündliche Werte an 28 Tagen) verglichen. Die IA-Werte sind

Tabelle 5.1: Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessenem und simuliertem Saftfluss im Zeitraum 14. August bis 11. September 2013 (jeweils 672 Wertepaare). Die Spalten stellen die zwei Pflanzenmodelle dar, die Zeilen die unterschiedlichen Evapotranspirationsmodule.

IA		Konfiguration	NSE	
SPASS	CERES		SPASS	CERES
0,91	0,94	$\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$	0,71	0,71
0,89	0,92	\mathbf{ET}_{FAO}	0,64	0,69
0,91	0,93	$\mathbf{ET}_{\text{Haude}}$	0,69	0,69

für alle Modellläufe sehr ähnlich und bewegen sich zwischen 0,89 und 0,94. Es gibt eine kleine Tendenz, dass die \mathbf{ET}_{FAO} -Simulationen den gemessenen Saftfluss etwas schlechter als die beiden anderen Evapotranspirationsmodule abbilden. Beide statistischen Maße sind außerdem in den CERES-Simulationen geringfügig höher als in den vergleichbaren SPASS-Simulationen.

Ein Grund für das unterschiedliche Verhalten der $\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$ - und der SPASS-Modelle ist die zeitliche Auflösung. Da \mathbf{ET}_{pot} und $\mathbf{T}_{\text{pot}}/\mathbf{T}_{\text{act}}$ bei diesen Modellansätzen in jedem Zeitschritt neu berechnet werden, kann das Modell schnell auf Änderungen im eingelese- nen Wetter (z. B. Strahlung oder relative Luftfeuchte) reagieren. In Übereinstimmung mit unseren Messungen können die simulierte, potentielle und aktuelle Transpiration sogar nachts positiv sein, falls $\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$ mit SPASS kombiniert wird. Die Verteilung von \mathbf{ET}_{pot} und $\mathbf{T}_{\text{pot}}/\mathbf{T}_{\text{act}}$ über den Tag zwischen 7:12 und 19:12 Uhr, die von \mathbf{ET}_{FAO} , $\mathbf{ET}_{\text{Haude}}$ und CERES benutzt wird, ist bei unserer geographischen Lage im Sommer – also wäh- rend unserer Messperiode – durchaus angemessen, da in diesem Zeitraum der Hauptteil der täglichen Solarstrahlung auf die Erdoberfläche trifft (Kraus 2004b). Im Frühjahr und im Herbst ist dieser Zeitraum aber zu lang. Außerdem setzen diese Modellansät- ze die nächtliche potentielle Evapotranspiration (und somit auch die Transpiration) grundsätzlich auf Null. Insbesondere kurz nach Sonnenaufgang und vor Sonnenunter- gang stiegen und sanken die Saftflussraten schnell. Zu dieser Zeit traten die größten Abweichungen zwischen Messung und Simulation auf, da zwar dieselben Werte auftra- ten, aber mit gewissem Zeitverzug. Hier bietet der $\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$ -Ansatz geringe Vorteile, da die Verteilung der Evapotranspiration über den Tag im Gegensatz zu den anderen zwei Ansätzen nicht genau fixiert ist sondern vom Modell anhand der Solarstrahlung ermittelt wird.

An Regentagen überschätzten alle Simulationen den gemessenen Saftfluss. Die Pflanzen transpirierten wenig aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte und der niedrigen Solarstrahlung. Die aktuelle Transpiration aller Modelle ist jedoch deutlich größer als Null. Da an diesen Tagen das Wasser im Boden kein Limitierungsfaktor für die Transpiration ist, sind die potentielle und aktuelle Transpiration gleich. Die potentielle Transpiration wiederum hängt hauptsächlich von der potentiellen Evapotranspiration ab, die möglicherweise größer ist als sie sein sollte. Der Zähler in Gleichung 4.7, welche von ET_{ASCE} und ET_{FAO} verwendet wird, besteht aus zwei Summanden. Der Erste hängt von der Strahlung ab, der Zweite hauptsächlich von der relativen Luftfeuchte. Wenn die relative Luftfeuchte hoch ist, nähert sich der zweite Summand dem Wert Null an während der Erste immer noch deutlich größer als Null ist. Die Verwendung der täglichen Wetterdaten (ET_{FAO}) scheint an diesen Tagen noch ein zusätzlicher Nachteil zu sein. Bei der Verwendung von ET_{Haude} hängt die potentielle Evapotranspiration nur von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte ab. An Regentagen ist dies von Vorteil, da der Strahlungsterm fehlt, der bei den Penman-Monteith-Ansätzen für die Überschätzung der potentiellen Evapotranspiration verantwortlich ist. Ein weiterer Punkt, der zur Überschätzung durch die Modelle an den Regentagen führt, ist, dass keines der Evapotranspirationsmodule direkt die stomatäre Leitfähigkeit der Blätter berücksichtigt. Somit wurde die strahlungsbedingte Öffnung der Stomata (Rochette u. a. 1991) von den Modellen nicht abgebildet, was zu einer Überschätzung an Tagen mit geringer Strahlung führte. Des Weiteren wurde keine Interzeptionsverdunstung simuliert. Im Gegensatz zu den Simulationen des Saftflusses, konnten wir aber Interzeption durch die Blätter beobachten. Bevor die Transpiration der Pflanzen nach einem Regenereignis wieder ansteigt, verdunstet das Interzeptions-Wasser, das sich auf der Blattoberfläche sammelt. Dies reicht zunächst, um den Unterschied im Wasserpotential zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche auszugleichen.

Von 15. bis 18. August (DOY 227 - 230) 2013 sind die Simulationen der potentiellen Transpiration teilweise höher als jene der aktuellen Transpiration und als der gemessene Saftfluss, wenn SPASS als Pflanzenmodell ausgewählt wurde. In diesen Zeiträumen ist der modellierte Blattflächenindex (LAI, siehe Abbildung 5.3) nahe an seinem Maximum. Dies führt dazu, dass ein vergleichsweise großer Anteil von ET_{pot} der potentiellen Transpiration zugeschlagen wird. Jedoch nimmt der Bodenwassergehalt, der die Transpiration limitieren kann, in den durchwurzelter Bodenschichten vom ersten bis zum vierten Tag dieser Periode ab. Dies wiederum führt zu einer Verringerung der modellierten aktuellen Transpiration, die den gemessenen Saftfluss anfänglich noch überschätzt,

diesen aber zum Ende hin etwas unterschätzt. Im Gegensatz dazu tritt bei der Auswahl von CERES kein Wasserstress auf. Dies ist hauptsächlich auf die im Vergleich zu SPASS größeren simulierten Wurzellängendichten und die damit verbundene höhere Wasseraufnahme durch die Wurzeln zurückzuführen. Ab 24. August (DOY 236) 2013 bis zum Ende des analysierten Zeitraums sind die potentielle und aktuelle Transpiration an den regenfreien Tagen gleich und unterscheiden sich nur wenig von den Saftflussmessungen. Die Unterschätzung, die am Ende der Simulationsperiode auftritt ist, durch eine etwas zu schnelle Abnahme des modellierten LAI (Abbildung 5.3) bedingt. Im Zeitraum der Saftflussmessung haben die SPASS Simulationen generell einen niedrigeren LAI als die CERES Simulationen, welche dadurch auch mehr Saftfluss simulieren. Die Wichtigkeit einer korrekten Repräsentation des LAIs im Modell wurde auch von Van Griensven u. a. (2014) gezeigt, die herausfanden, dass genauere LAI-Werte ihre Evapotranspirations-Simulationen über Waldregionen verbesserten.

Da beide Pflanzenmodelle in unserer Studie ursprünglich Bestandesmodelle sind, könnten in Wirklichkeit Blumentopfeffekte im Lysimeter und Randeckeffekte an der Lysimeterwand aufgetreten sein, welche von den Modellen nicht abgebildet wurden. Diese Effekte sind u. a. vermindertes Wurzelwachstum in seitlicher Richtung an den Lysimeterwänden und erhöhtes Tiefenwachstum der Wurzeln bis hin zum Grund des Lysimeters, wo sich Wasser sammelt bevor es perkoliert. So fanden zum Beispiel Berliner und Oosterhuis (1987) bei Weizenpflanzen in einem Lysimeter erhöhte Wurzellängendichten in einer Tiefe von 0,6 m und darunter, während in ihrem Kontrollfeld die Wurzellängendichten monoton mit der Tiefe abnahmen. Außerdem waren in ihrer Studie die Pflanzen im Lysimeter später wassergestresst als jene auf dem Feld, wohingegen im Lysimeter der Wasserstress plötzlicher auftrat.

Manoli u. a. (2015) führten eine Modellstudie über räumlich verteilte Erträge durch. Sie fanden heraus, dass die Durchwurzelungstiefe einen großen Einfluss auf die simulierten Erträge und die Transpirationen von Mais hat. In unserer Studie jedoch hatte eine Erhöhung der maximalen Durchwurzelungstiefe von 80 cm auf 200 cm keine Auswirkungen auf die Simulationen, da während der Längenwachstumsphase der Wurzeln genügend Wasser in den obersten Bodenschichten vorhanden war. Dies verhinderte das weitere Tiefenwachstum der Wurzeln sobald sie 80 cm Bodentiefe erreichten.

5.1.2 Blattflächenindex (LAI)

Die Simulationen des Blattflächenindex (LAI) zwischen 16. Mai (DOY 136) und 16. November (DOY 320) sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Das Pflanzenmodell bestimmt die Entwicklung der Blattfläche hauptsächlich, während die Wahl des Evapotranspirationsmoduls nur einen kleinen Einfluss hat. Nach dem Auflaufen steigen die von den SPASS-Modellen simulierte LAIs schnell an und erreichen am 9. August (DOY 221) ihre Maxima von etwa $0,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ET_{ASCE} und ET_{Haude}) und $0,88 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ET_{FAO}). Dieses Datum markiert gleichzeitig das Ende der vegetativen Phase. In der darauffolgenden generativen Phase verringert sich der LAI aufgrund von Seneszenz kontinuierlich, welche von der Pflanzenentwicklung abhängt. Vom 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) nimmt der LAI von ungefähr $0,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ auf $0,35 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ab. Zu Anfang und Ende der Wachstumsperiode (bis DOY 180 und ab DOY 280) ist der Einfluss des ausgewählten Evapotranspirationsmodells auf die Modellergebnisse sehr gering.

Im CERES-Modell steigt der LAI zuerst langsamer als im SPASS-Modell an, erreicht dann aber seinen Höhepunkt schon um den 29. Juli (DOY 210): $0,93 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ET_{ASCE}), $0,99 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ET_{FAO}), und $0,87 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ET_{Haude}). In der darauffolgenden Phase verringert sich der LAI erst langsam und dann schneller. Ab 10. Oktober (DOY 283) werden sprunghafte Abnahmen des LAIs simuliert. Ab 22. Juli (DOY 203) wird der Einfluss der Auswahl des Evapotranspirationsmoduls deutlich. Im Zeitraum der Saftflussmessungen nimmt der LAI um etwa 30% ab. Die Blattfläche wächst bis einschließlich CERES-Entwicklungsstadium 3, das am 30. Juli (DOY 211) endet. Schon ab Entwicklungsstadium 2 findet Blattseneszenz statt, diese wird aber erst deutlicher, wenn das Blattwachstum aufhört. Die sprunghaften Abnahmen des modellierten LAIs entstehen dadurch, dass die Blattseneszenz in jedem Entwicklungsstadium unterschiedlich modelliert wird (vgl. Abschnitt 4.2.3.2).

Die sehr niedrig simulierten LAI-Werte mögen überraschend sein. Jedoch war die Pflanzdichte von 5 Pflanzen pro m^2 auf dem Lysimeter niedriger als unter typischen Feldbedingungen. Dort beträgt die Pflanzdichte – abhängig von der Sorte und dem Wasserangebot – zwischen 6 und 10 Pflanzen pro m^2 . Um den LAI zu ermitteln, multiplizieren die Modelle die Pflanzdichte direkt mit der berechneten Blattfläche pro Pflanze. Zusätzlich war 2013 ein sehr schlechtes Anbaujahr für Mais. Besonders Bayern litt unter der ungünstigen Witterung, z. B. unter lang anhaltenden Trockenperioden, weshalb die Erträge von Korn- und Silomais ungefähr 20% niedriger als der langjährige Durchschnitt waren. Darüber hinaus erhöhten die sehr sandigen Böden im Lysimeter wegen ihres geringen Wasserhaltevermögens den Wasserstress auf die Pflanzen, was wie-

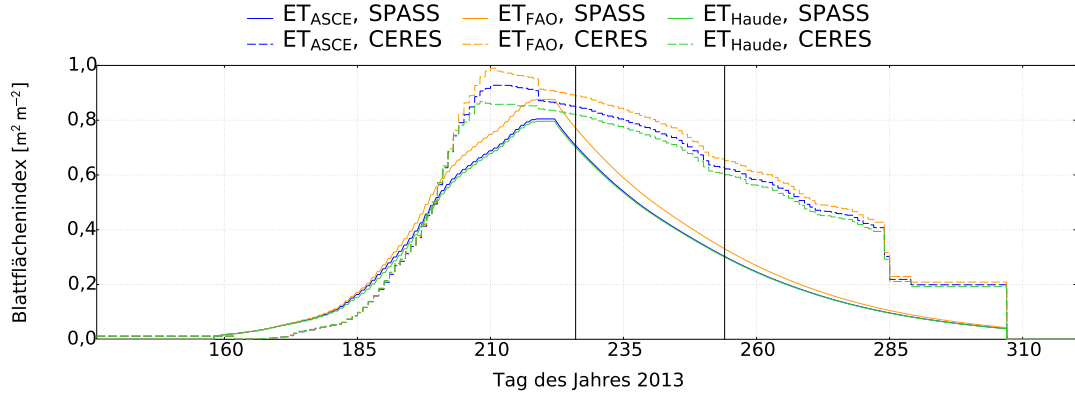


Abbildung 5.3: Zeitreihe der simulierten Blattflächenindizes [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] von 16. Mai bis 16. November 2013. Simulationen, die auf verschiedene Evapotranspirationsmodule zurückzuführen sind, werden in blau (ET_{ASCE}), gelb (ET_{FAO}) und grün (ET_{Haude}) abgebildet, die durchgezogenen (SPASS) und gestrichelten (CERES) Linien stellen das ausgewählte Pflanzenmodell dar. Die vertikalen, schwarzen Linien kennzeichnen den Zeitraum der Saftflussmessung von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013.

derum auch zu einer Unterversorgung mit Nährstoffen führen kann. Diese Mängel an Wasser und Nährstoffen werden in den Modellen berücksichtigt.

Die phänologische Entwicklung wird im Gegensatz zum LAI nur durch das Pflanzenmodell bestimmt. Da SPASS bei der Simulation von Mais nur zwischen der vegetativen und der generativen Phase unterscheidet, ist die Kurve der Entwicklung sehr gleichmäßig und kontinuierlich. Das Auflaufen wurde Anfang Juni simuliert. Die neun Entwicklungsstadien von CERES führen hingegen zu einer Entwicklung, die je nach Stadium langsamer oder schneller als jene von SPASS vonstatten geht. Das Auflaufen fand bei CERES schon Ende Mai statt. Bedingt durch das frühere Auflaufen ist die phänologische Entwicklung bei CERES immer ein Stück vor der Entwicklung von SPASS. Deshalb erreicht das CERES Modell auch das finale BBCH-Stadium (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) von 92, während SPASS maximal 80 erreicht.

5.1.3 Bodenwassergehalte

Die gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte in 10 cm, 50 cm und 80 cm Tiefe sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die modellierten Wassergehalte liegen in 10 cm Tiefe zwischen $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, in 50 cm Tiefe zwischen $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, und in 80 cm Tiefe zwischen $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Kurzfristige Schwankungen der simulierten Bodenwassergehalte treten mit zunehmender Tiefe seltener auf. Die Maxima der simulierten Bodenwassergehalte in 50 cm und 80 cm Tiefe traten im Modell am 1. Juni (DOY 152) 2013 auf, die Minima am 24. August (DOY 236) bzw. am 10. September (DOY 253) 2013. Dies sind dieselben Zeitpunkte wie bei den Messungen der Bodenfeuchte (siehe Abschnitt 3.2).

Bis Anfang März (um DOY 60) unterscheiden sich die simulierten Bodenwassergehalte der einzelnen Modellkonfigurationen nur wenig, da das Nichtvorhandensein der Pflanzen sowie die niedrige Temperatur und Strahlung zu sehr ähnlichen Simulationsergebnissen für die potentielle und somit auch für die aktuelle Evapotranspiration führt. Ab dann werden in allen drei Tiefen die höchsten Wassergehalte unter Anwendung des ET_{Haude} -Ansatzes simuliert, die niedrigsten unter Anwendung von ET_{FAO} . Wenn der LAI gleich Null ist, wird die potentielle Evapotranspiration vollständig der potentiellen Evaporation zugeordnet (Gleichung 4.5), weshalb dann auch aktuelle Evaporation und aktuelle Evapotranspiration gleich sind. Wenn Temperatur und Strahlung zunehmen, werden die drei unterschiedlichen Evapotranspirationssimulationen in den modellierten Bodenwassergehalten deutlicher. Je nach Modellkonfiguration wird eine unterschiedliche Menge an Wasser aus der obersten Bodenschicht entnommen, was sich nach und nach auch auf die Wassergehalte in den weiter unten liegenden Bodenschichten auswirkt.

Anfang Juni (um DOY 152) glichen sich alle Simulationen aufgrund von starkem Niederschlag aneinander an. Dies führte auch zu den höchsten simulierten Bodenwassergehalten in 2013. Als die Pflanzen Ende Mai (SPASS) bzw. Anfang Juni (CERES) aufhiefen, entwickelten sich Unterschiede in den Dynamiken der modellierten Bodenwassergehalte, die auf die Wahl des Pflanzenmodells zurückzuführen sind. Diese Unterschiede werden zunehmend deutlicher, wenn sich die Wassergehalte verringern. Bei Wassereintrag in den Boden hingegen gleichen sich die Bodenwassergehalte der verschiedenen Simulationen wieder an. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Modellen werden ab 20. Juli (DOY 201) in 10 cm und 50 cm Tiefe größer, etwa 10 Tage später in 80 cm Tiefe. Wenn SPASS als Pflanzenmodell ausgewählt ist, sind in allen Tiefen die ET_{ASCE} und ET_{Haude} Wassergehalte höher als jene von ET_{FAO} . Die CERES-Simulationen wiederum zeigen in allen drei Tiefen die höchsten Wassergehalte in Kom-

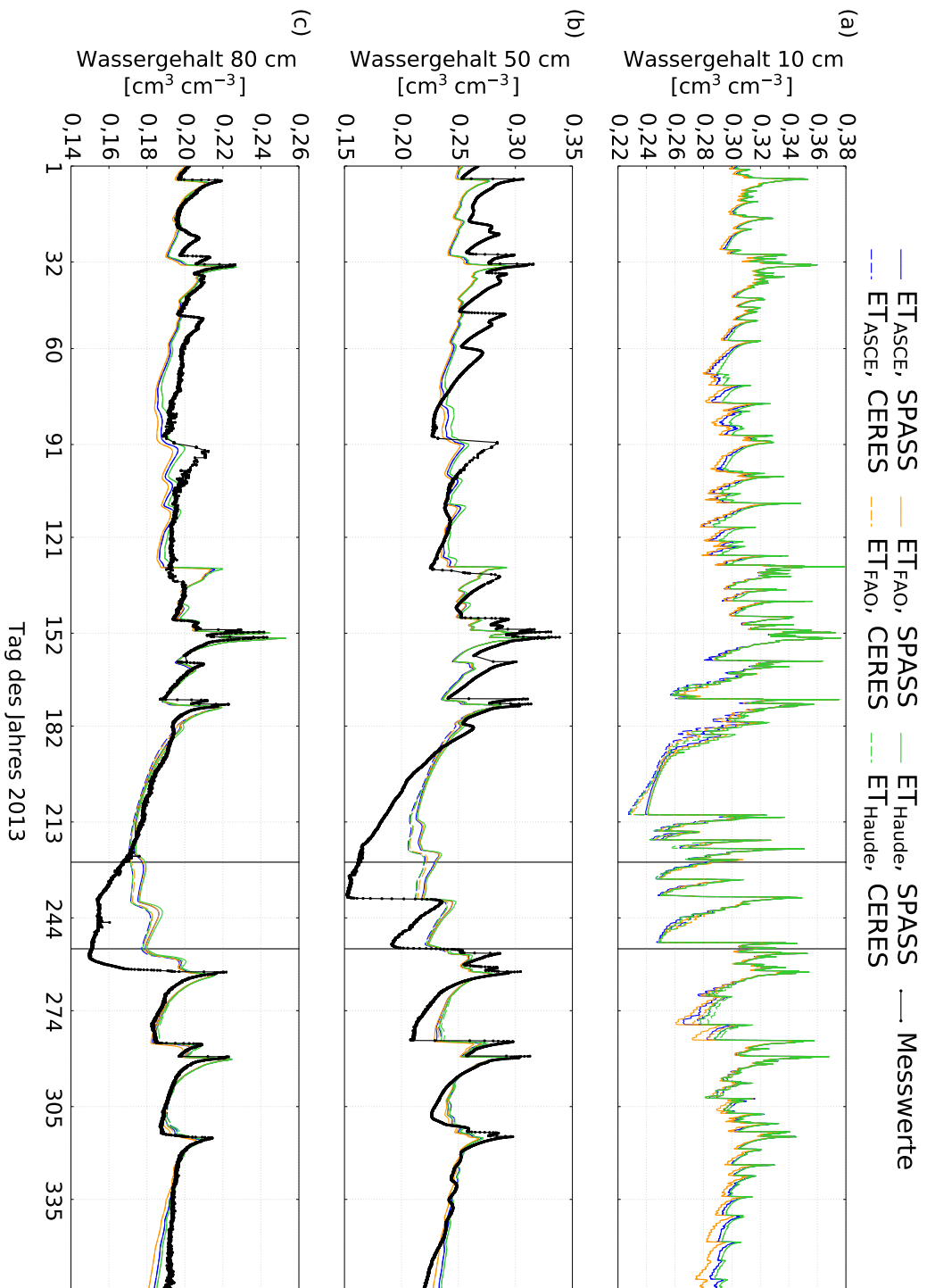


Abbildung 5.4: Zeitreihe der gemessenen (durchgezogene, schwarze Linie mit Punkten) und simulierten Bodenwassergerhalte [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] in (a) 10 cm, (b) 50 cm und (c) 80 cm Tiefe im Jahr 2013. Simulationen, die auf verschiedene Evapotranspirationsmodule zurückzuführen sind, werden in blau (ET_{ASCF}), gelb (ET_{FAO}) und grün (ET_{Haude}) abgebildet, die durchgezogenen (SPASS) und gestrichelten (CERES) Linien stellen das ausgewählte Pflanzenmodell dar. Die vertikalen, schwarzen Linien kennzeichnen den Zeitraum der Saftflussmessung von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013.

Tabelle 5.2: Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten in (a) 50 cm und (b) 80 cm Tiefe im Jahr 2013 (5405 verfügbare Wertepaare). Die Spalten stellen die zwei Pflanzenmodelle dar, die Zeilen die unterschiedlichen Evapotranspirationsmodule.

(a) Bodenwassergehalte 50 cm				
IA			NSE	
SPASS	CERES	Konfiguration	SPASS	CERES
0,78	0,83	$\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$	0,57	0,63
0,77	0,81	\mathbf{ET}_{FAO}	0,55	0,61
0,77	0,83	$\mathbf{ET}_{\text{Haude}}$	0,55	0,63

(b) Bodenwassergehalte 80 cm				
IA			NSE	
SPASS	CERES	Konfiguration	SPASS	CERES
0,81	0,85	$\mathbf{ET}_{\text{ASCE}}$	0,52	0,59
0,79	0,83	\mathbf{ET}_{FAO}	0,49	0,54
0,81	0,85	$\mathbf{ET}_{\text{Haude}}$	0,51	0,59

bination mit \mathbf{ET}_{FAO} . Vergleicht man die Simulationen, die dasselbe Evapotranspirationsmodul, aber ein unterschiedliches Pflanzenmodell verwenden, erkennt man, dass die CERES-Simulationen bis 1. September (DOY 244) niedrigere Wassergehalte als die entsprechenden SPASS-Simulationen aufweisen: bis zu $0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 10 cm und 50 cm Tiefe und $0,007 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 80 cm Tiefe.

Dies kann mithilfe der unterschiedlich simulierten Blattflächenindizes erklärt werden: ab 19. Juli (DOY 200) ist der von SPASS simulierte LAI niedriger als der von CERES (Abbildung 5.3). Somit tritt in den SPASS-Simulationen mehr Evaporation und weniger Transpiration auf. Dies bedeutet, dass Wasser vermehrt aus der obersten Bodenschicht entnommen wird, aber auch dass mehr Wasser als bei CERES ungehindert versickern kann. Im CERES-Modell ist der LAI höher. Dies führt dazu, dass ein größerer Anteil der potentiellen Evapotranspiration der Transpiration zugeordnet wird. Die Konsequenz davon ist, dass vergleichsweise mehr Wasser aus den durchwurzelten Bodenschichten entnommen wird und somit die Bodenwassergehalte in all diesen Schichten reduziert werden. Ein weiterer Grund für die niedrigeren Bodenwassergehalte der CERES-Simulationen ist die im Vergleich zu SPASS höhere Durchwurzelungsdichte, welche es CERES erlaubt, mehr Wasser aus jeder Bodenschicht zu entnehmen.

Die Übereinstimmung zwischen Simulationen und Messungen der Bodenwassergehalte ist in 50 cm und in 80 cm Tiefe generell zufriedenstellend. Die gemessenen Spitzen werden auch von den Modellen simuliert. Allerdings treten bei niedrigen Wassergehalten (unterhalb von $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 50 cm und $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 80 cm Tiefe) größere Unterschiede zwischen Messung und Simulation auf.

Die IA- und NSE-Werte der unterschiedlichen Modellkonfigurationen werden in Tabelle 5.2 gezeigt. Da es in beiden Tiefen über einen langen Zeitraum (etwa 7 Monate) sehr wenige Abweichungen zwischen den simulierten Bodenwassergehalten gibt, sind sich auch die statistischen Maße sehr ähnlich. Die Dynamiken der Bodenwassergehalte in 80 cm Tiefe (IA zwischen 0,79 und 0,85; NSE zwischen 0,49 und 0,59) werden von den Modellen ähnlich gut wie die Dynamiken in 50 cm Tiefe (IA zwischen 0,77 und 0,83; NSE zwischen 0,55 und 0,63) abgebildet. Es gibt eine geringe Tendenz, dass Simulationen mit ET_{Haude} und ET_{ASCE} in Verbindung mit CERES etwas besser als die anderen vier Modellkonfigurationen sind.

Diese NSE-Werte sind höher als jene von Stumpp u. a. (2012), die Bodenwassergehalte in fünf Lysimetern auswerteten. Abhängig von der Bodentiefe berechneten sie NSE-Werte zwischen -9,51 und 0,05 für das am wenigsten genau simulierte Lysimeter und NSE-Werte zwischen -0,4 und 0,46 für das am besten simulierte. Herbst u. a. (2005) überprüften verschiedene Modelle für den Bodenwasserfluss. Sie erreichten unter Verwendung eines Modells, das auf einer eindimensionalen Richards-Gleichung basiert, in 25 cm und 85 cm Bodentiefe IA-Werte höher als 0,9 während ihr verwendetes Kapazitätsmodell nicht so gute Ergebnisse lieferte.

Die Unterschiede zwischen den Modellrechnungen und den Messungen lassen sich wie folgt begründen: In manchen Zeiträumen war die simulierte aktuelle Evapotranspiration zu hoch. Dies kann einerseits auf starke Evaporation aus der obersten Bodenschicht und andererseits auf hohe Wasseraufnahme durch die Pflanzen aus den durchwurzelt Bodenschichten zurückzuführen sein. Letzteres ist in Übereinstimmung mit der Überschätzung des Saftflusses bzw. der Transpiration durch die Modelle an den regnerischen Tagen, die durch geringe Tagesmaxima des Saftflusses charakterisiert sind (Abbildungen 5.1 und 5.2). Während die Messungen des Bodenwassergehaltes dafür sprechen, dass das Bodenwasser von den Pflanzen aus tieferen Bodenschichten aufgenommen wurde, nahmen die Pflanzen im Modell das Wasser aus weiter oben liegenden Schichten auf. Dies wird zum Beispiel in Abbildung 5.4 deutlich, die zeigt, dass der simulierte Wassergehalt in 10 cm Tiefe im Juli von $0,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ auf $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (CERES) bzw. $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (SPASS) stark abnimmt, während die Modelle gleichzeitig anfangen, die

Messwerte in 50 cm Tiefe zu überschätzen. Im weiteren Verlauf bis zum Ende der Saftflussmessungen tritt diese Überschätzung auch in 80 cm Tiefe zu Tage. Das Regenwasser hingegen wird in dieser Zeit direkt nach dem Eintrag in den Boden von den modellierten Pflanzen in 10 cm Tiefe aufgenommen. Weitere Unsicherheiten können auch durch Unsicherheiten in den Modellparametern, z.B der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, begründet sein (Mishra und Parker 1989). Dieser Parameter ist in natürlichen Böden sehr schwer zu ermitteln, weil einerseits die Porosität lokal sehr heterogen sein kann und andererseits sich der Boden mit der Zeit verdichtet. Deshalb wurden für diese Studie verschiedene gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten getestet, was allerdings nicht zu einer Verbesserung der Modellergebnisse führte.

5.1.4 Wasserbilanz

Die Tagessummen der gemessenen und simulierten Evapotranspiration, Perkolation und Änderung des Bodenwassergehaltes in der ganzen Bodensäule sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Von einem Tag auf den anderen änderte sich die gemessene Evapotranspiration sehr stark. So folgte z. B. Anfang August der Tag mit der maximalen täglichen Evapotranspiration von $3,9 \text{ mm d}^{-1}$ auf einen Tag ohne Evapotranspiration. Schon im Mai wurden tägliche Evapotranspirationsraten von bis zu $2,5 \text{ mm d}^{-1}$ gemessen. Ab Anfang Oktober erreichte die maximale tägliche Evapotranspiration noch etwa $1,0 \text{ mm d}^{-1}$. Die tägliche Perkolation war meistens kleiner als $2,0 \text{ mm d}^{-1}$, aber es wurden auch fünf stärkere Ausschläge registriert. An diesen Tagen lag die gemessene Perkolation zwischen $4,0 \text{ mm d}^{-1}$ und $22,0 \text{ mm d}^{-1}$. Die tägliche Änderung des Bodenwassers im Lysimeter bewegte sich im Bereich von $-35,0 \text{ mm d}^{-1}$ bis $38,0 \text{ mm d}^{-1}$. Diese Extrema wurden Ende Mai und Anfang Juni beobachtet. Verliert die Bodensäule des Lysimeters Wasser tritt entweder Perkolation oder Evapotranspiration auf. Dabei sind die stark negativen Werte hauptsächlich mit den Perkolationsspitzen zu assoziieren, während schwach negative Werte meistens mit Evapotranspiration zusammenhängen (falls kein zusätzlicher Wassereintrag stattfindet).

Die modellierten täglichen Evapotranspirationsraten ändern sich ebenfalls von Tag zu Tag stark. Der Maximalwert lag hier bei $4,7 \text{ mm d}^{-1}$. Es gab jedoch auch zwei längere Zeiträume in denen die simulierte Evapotranspiration konstant bei etwa $1,0 \text{ mm d}^{-1}$ lag: Mitte Juli (DOY 192-210) und Anfang September (DOY 244-250). Beide Perioden sind durch ein längeres Ausbleiben von Regen charakterisiert, was zu sehr geringen Bodenwassergehalten in den obersten Bodenschichten und somit zu einer Limitierung der Evaporation führte. Teilweise wurde dadurch auch die Transpiration limitiert, aber nicht

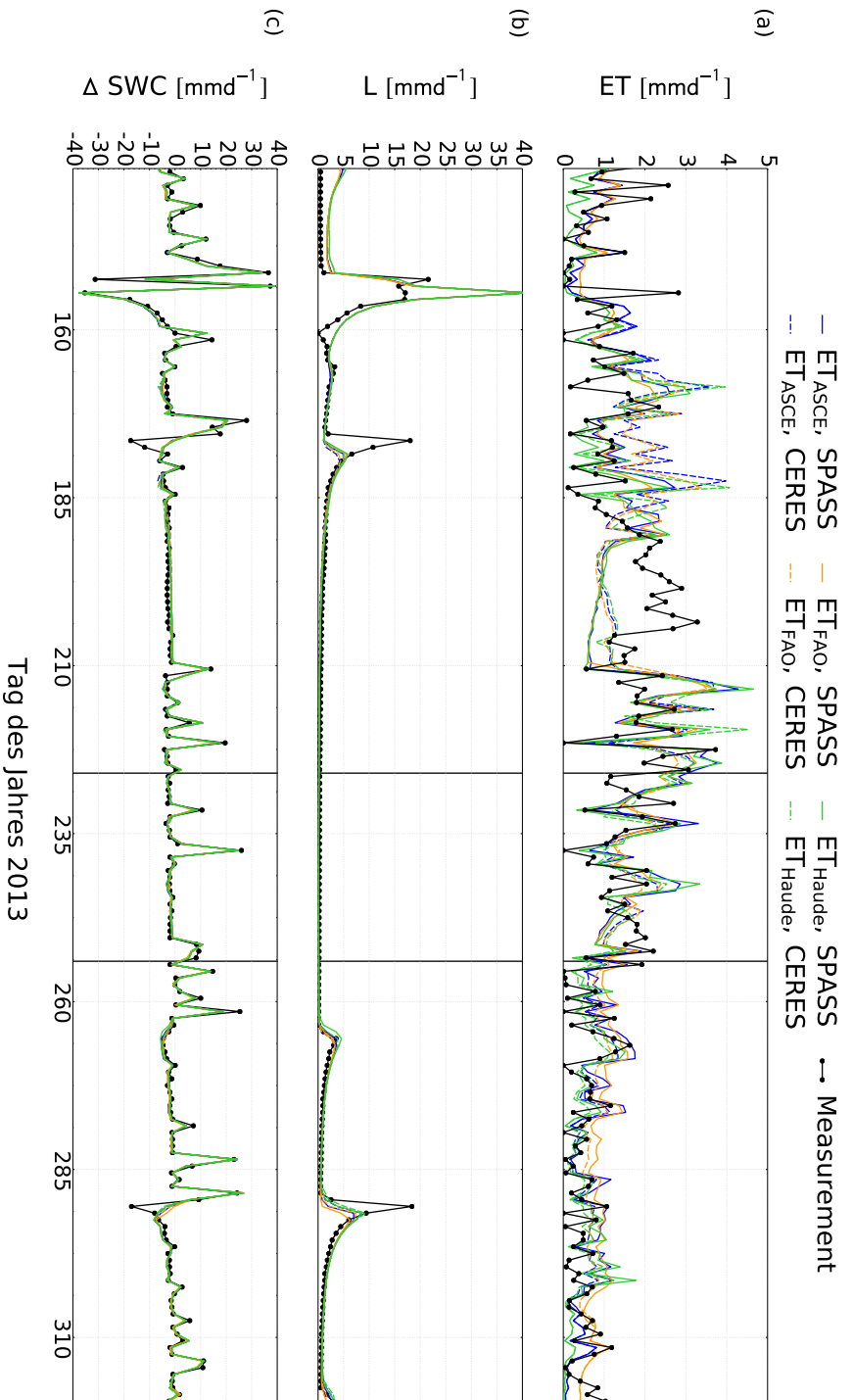


Abbildung 5.5: Zeitreihe der gemessenen (durchgezogene, schwarze Linie mit Punkten) und simulierten täglichen Lysimeter-Wasserbilanz von 16. Mai bis 16. November 2013: (a) aktuelle Evapotranspiration (ET), (b) Perkolations (L), und (c) Änderung des Wassergehaltes (SWC) der ganzen Bodensäule. Simulationen, die auf verschiedene Evapotranspirationsmodule zurückzuführen sind, werden in blau (ET_{ASCE}), gelb (ET_{FAO}) und grün (ET_{Haude}) abgebildet, die durchgezogenen (SPASS) und gestrichelten (CERES) Linien stellen das ausgewählte Pflanzenmodell dar. Die vertikalen, schwarzen Linien kennzeichnen den Zeitraum der Saftflussmessung von 14. August (DOY 226) bis 11. September (DOY 254) 2013.

so stark wie die Evaporation, da die Pflanzen im Modell weiterhin aus tieferen Bodenschichten Wasser aufnehmen konnten. Insbesondere bis 6. August (DOY 218) 2013 ist die Evapotranspiration der CERES-Simulationen höher als die Evapotranspiration der SPASS-Simulationen. Die modellierte Perkolation ist meistens geringer als $2,0 \text{ mm d}^{-1}$. Es wurden aber auch sechs deutliche Peaks simuliert. Fünf davon weisen Perkulationsraten von $3,0 \text{ mm d}^{-1}$ bis $10,0 \text{ mm d}^{-1}$ auf, und eine der Spitzen erreicht $40,0 \text{ mm d}^{-1}$. Die tägliche Änderung des Bodenwassergehaltes wurde zwischen $-38,0 \text{ mm d}^{-1}$ und $40,0 \text{ mm d}^{-1}$ simuliert.

Während die gemessene Perkolation und die gemessene Änderung des Bodenwassergehaltes gut von den Modellen simuliert werden, gibt es bei der Simulation der Evapotranspiration deutliche Defizite. Tabelle 5.3 zeigt die IA- und NSE-Werte der unterschiedlichen Modellkonfigurationen. Betrachtet man diese beiden statistischen Maße werden Perkolation und Änderung des Bodenwassergehaltes am Besten simuliert, wenn ET_{Haude} ausgewählt wird. Generell ist die Variation innerhalb der IA-Werte geringer als bei den NSE-Werten. Der Vergleich von simulierter und gemessener Evapotranspiration ergibt NSE-Werte, die um Null herum und leicht darunter liegen. Dies bedeutet, dass der Mittelwert der Messungen die einzelnen Messwerte genauso gut abbilden würde wie diese Simulationen. Die Statistik der NSE-Werte suggeriert, dass die Evapotranspiration mit dem ET_{FAO} , SPASS-Ansatz am besten simuliert werden kann, die Statistik des IA ergibt wiederum den besten Wert, wenn ET_{Haude} und SPASS ausgewählt sind. Im Falle der Evapotranspiration werden mit den SPASS-Simulationen geringfügig bessere IA- und NSE-Werte erzielt als mit den entsprechenden CERES-Simulationen.

Die integrierten Evapotranspirationen, Perkolationen und Änderungen des Bodenwassergehaltes von 16. Mai bis 16. November 2013 sind aufgeschlüsselt nach Messung und Modellkonfiguration in Tabelle 5.4 dargestellt. ET_{Haude} in Verbindung mit SPASS und CERES unterschätzen die gemessene Evapotranspirationssumme nur um 1,4 % bzw. 3,4 %. Die anderen Modellkonfigurationen überschätzen die kumulative Evapotranspiration minimal um 12,2 % (ET_{ASCE} , SPASS), und maximal um 17,5 % (ET_{FAO} , SPASS). Die gemessene, kumulative Perkolation von 16. Mai bis 16. November liegt bei 327,4 mm während in den Simulationen zwischen 345 mm (beide ET_{FAO} -Simulationen) und 383 mm (ET_{Haude} , SPASS) Wasser perkolieren. Diese Überschätzung des aufsummierten Abflusses steht in Widerspruch zu Skaggs u. a. (2006b), die mit dem HYDRUS-Modell eine geringe Unterschätzung der gemessenen Perkolation simulierten. Sie wählten jedoch eine andere Randbedingung, bei der Perkolation nur dann auftrat, wenn die unterste Bodenschicht wassergesättigt ist (Šimůnek u. a. 1998), während wir die besten

Tabelle 5.3: Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessener und simulierter (a) Evapotranspiration, (b) Perkolation, und (c) Änderung des Wassergehaltes in der ganzen Bodensäule. Die Spalten stellen die zwei Pflanzenmodelle dar, die Zeilen die unterschiedlichen Evapotranspirationsmodule. Die Gesamtanzahl der Wertepaare ist 184, was jeweils den Tageswerten der einzelnen Größen zwischen 16. Mai und 16. November 2013 entspricht.

(a) Evapotranspiration				
IA			NSE	
SPASS	CERES	Konfiguration	SPASS	CERES
0,71	0,68	ET_{ASCE}	-0.03	-0.11
0,66	0,65	ET_{FAO}	0.04	-0.05
0,73	0,71	ET_{Haude}	-0.02	-0.09

(b) Perkolation				
IA			NSE	
SPASS	CERES	Konfiguration	SPASS	CERES
0,83	0,84	ET_{ASCE}	0,31	0,33
0,82	0,83	ET_{FAO}	0,30	0,32
0,85	0,85	ET_{Haude}	0,35	0,36

(c) Änderung des Bodenwassergehaltes				
IA			NSE	
SPASS	CERES	Konfiguration	SPASS	CERES
0,96	0,96	ET_{ASCE}	0,85	0,85
0,95	0,96	ET_{FAO}	0,84	0,85
0,96	0,96	ET_{Haude}	0,86	0,86

Tabelle 5.4: Gemessene und simulierte kumulative Evapotranspiration (ET), Perkolation (L) und Änderung des Wassergehaltes in der ganzen Bodensäule (ΔSWC) von 16. Mai bis 16. November 2013.

	Messwert [mm]	SPASS			CERES		
		ET_{ASCE} [mm]	ET_{FAO} [mm]	ET_{Haude} [mm]	ET_{ASCE} [mm]	ET_{FAO} [mm]	ET_{Haude} [mm]
ET	196,8	220,9	231,3	190,2	222,5	230,1	194,0
L	327,4	352,0	344,5	383,2	350,0	344,6	379,0
ΔSWC	9,3	-6,4	-9,6	-7,2	-5,8	-8,6	-6,8

Ergebnisse mit „freiem Abfluss“, d. h. mit einheitlichem Gradienten des Bodenwasserpotentials, als untere Randbedingung erzielten. Loos u. a. (2007) wählten ebenfalls letztere Randbedingung, um dieselben Lysimeter zu simulieren. Die Schichtung mit Kies am Grund des Lysimeters, der mit zunehmender Tiefe gröber wird, mag jedoch eine Randbedingung erfordern, die auf irgendeine Art „zwischen“ diesen zwei Randbedingungen liegt. Der Wassergehalt im gesamten Lysimeter nahm in den sechs Monaten ab 16. Mai um 9,3 mm zu, während alle Modellkonfigurationen eine geringe Abnahme um maximal 9,6 mm simulierten.

Die Verknüpfung der Statistiken mit der kumulativen Evapotranspiration zeigt, dass es Zeiträume gab, in denen die Modelle die Evapotranspiration überschätzten und andere Zeiträumen in denen sie die Evapotranspiration unterschätzten. Dies wird auch in Abbildung 5.5a deutlich: von DOY 159 bis 187 und von DOY 212 bis 245 ist die modellierte Evapotranspiration meistens höher als die Gemessene, während es von DOY 191 bis 209 und von DOY 245 bis 252 genau andersherum ist. Die Überschätzung der Evapotranspiration tritt hauptsächlich in Zeiträumen mit viel Niederschlag auf. In diesen Perioden wird die simulierte aktuelle Transpiration nicht limitiert, da in den durchwurzelten Bodenschichten, besonders im Oberboden, genug Wasser vorhanden war (siehe Regentage und die Tage danach in Abbildung 5.1). Ebenfalls nicht limitiert war die Evaporation aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in der ersten Bodenschicht. Also wurde in den Modellen das Wasser aus den oberen Bodenschichten entnommen, während es in Wirklichkeit für die Aufnahme durch die Pflanzen in tieferen Bodenschichten zur Verfügung stand, oder sogar aus dem Lysimeter ausfloss. Im Zusammenhang dazu war der simulierte Wassergehalt in 50 cm Tiefe bis zu $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ kleiner als der Gemessene (Abbildung 5.4). Der starke Ausschlag in der Perkolation am 25. Juni (DOY 276) wurde ebenfalls von den Modellen unterschätzt und im Vergleich zur Messung erst zwei Tage später simuliert. Im darauffolgenden Zeitraum gab es sehr wenig Wassereintrag in das System, was zur Limitierung der simulierten Evapotranspiration und Transpiration führte, während eine stärkere Wasseraufnahme aus den tieferen Bodenschichten gemessen wurde.

Da in einem dreiwöchigen Zeitraum im Juli keinerlei Niederschlag fiel, waren die Pflanzen möglicherweise wassergestresst. Dies könnte einen Einfluss auf das Wurzelwachstum gehabt haben, d. h. die Wurzellängendichte, die in den Modellen exponentiell von den oberen zu den unteren Bodenschichten abnimmt, spiegelt eventuell nicht die Realität wider. Huck u. a. (1983) untersuchten die Anpassungsfähigkeit von Sojabohnen in einem sandigen Boden, indem sie dem System Wasser einmal nur durch natürlichen

Niederschlag zuführten und ein anderes Mal das System zusätzlich noch bewässerten. Im bewässerten System nahm das Wurzelwachstum mit zunehmender Bodentiefe ab. Im wassergestressten System hingegen war das Wurzelwachstum generell höher. Dort konnten sie das höchste Wurzelwachstum in 120 cm Tiefe beobachten während die oben liegenden Wurzeln abstarben. Sharp und Davies (1985) untersuchten die Auswirkungen von Trockenstress auf die Wasseraufnahme und das Wurzelwachstum von Maispflanzen. In trockeneren Böden war das Wurzelwachstum in den oberen Bodenschichten eingeschränkt, während unterhalb von 60 cm Tiefe erhöhtes Wachstum beobachtet werden konnte. Außerdem konnten die tiefer liegenden Wurzeln der wassergestressten Pflanzen mehr Wasser pro Wurzellänge aufnehmen als die Wurzeln in den weiter oben liegenden Bodenschichten. Carminati u. a. (2009) erklärten dieses Phänomen mit dem Kontaktverlust zwischen Wurzeln und Boden, der durch das Schrumpfen der Wurzeln in Trockenperioden entsteht. Sie fanden heraus, dass nach dem Wiederbefeuchten manche der Wurzeln erneut wuchsen und somit der Kontakt zwischen Boden und Wurzeln wieder hergestellt wurde. Jedoch besonders um ältere Pfahlwurzeln herum blieben Hohlräume bestehen. Allerdings identifizierten Carminati u. a. (2012) in einer darauf aufbauenden Publikation, dass die Abnahme der Transpiration und des Matrixpotentials im Boden der Auslöser für den Kontaktverlust der Wurzeln war, und sich nicht wie zuerst vermutet die Transpiration durch den Kontaktverlust der Wurzeln mit dem Boden reduzierte. Sie stellten aber zusätzlich ein konzeptionelles Modell vor, in dem der Prozess der Hohlrumbildung selbstverstärkend ist, da sich die hydraulische Leitfähigkeit zwischen Wurzeln und Boden bei Austrocknung immer weiter reduziert, was wiederum zum weiteren Schrumpfen der Wurzeln führt.

5.2 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes: Xylemfluss

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Xylemflussmodells beschrieben und mit Messwerten vom Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern verglichen. Die detaillierte Beschreibung der Messwerte befindet sich in den entsprechenden Abschnitten von Kapitel 3.

5.2.1 Bodenwassergehalte

Die simulierten und gemessenen Wassergehalte in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Bodenwassergehalte, welche in allen drei Tiefen Mittelwerte der drei verschiedenen Messergebnisse sind (vgl. Abbildung 3.6), liegen zwischen $0,076 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,196 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 10 cm Tiefe, zwischen $0,077 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,166 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 30 cm Tiefe, und zwischen $0,169 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ und $0,272 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ in 50 cm Tiefe.

Je nach Simulation nehmen die Minima der simulierten Bodenwassergehalte in 10 cm Tiefe Werte zwischen $0,068 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 2) und $0,070 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 1), in 30 cm Tiefe Werte zwischen $0,071 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 2) und $0,075 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 1), und in 50 cm Tiefe Werte zwischen $0,173 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 2) und $0,175 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 1) an. Die Maxima der simulierten Wassergehalte betragen in der obersten Messtiefe etwa $0,192 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Pflanze 1) bzw. $0,190 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (andere Pflanzen), in der mittleren Messtiefe etwa $0,155 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, und in der untersten Messtiefe etwa $0,267 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Somit sind in 10 cm und 30 cm Tiefe die Extrema der Messwerte geringfügig höher als die der Simulationen. In 50 cm Tiefe hingegen ist das gemessene Minimum der Bodenwassergehalte niedriger als das Modellerte, und das Maximum höher.

Die simulierten Bodenwassergehalte aller drei Tiefen steigen bei Niederschlag (vgl. Abbildung 3.8b) an, wobei der Anstieg in 10 cm Tiefe grundsätzlich am deutlichsten und schnellsten ist. Von 14. - 17. August (DOY 226 - 229) erhöhen sich die modellierten Wassergehalte in allen Messtiefen vergleichsweise langsam, während die gemessenen Wassergehalte nur in der obersten Bodenschicht merklich ansteigen. An diesen Tagen hat es vergleichsweise wenig geregnet (ca. 5 mm d^{-1}). Am 24. August hingegen (DOY 236), dem Tag mit dem meisten Niederschlag in der Messperiode ($15,5 \text{ mm d}^{-1}$), stiegen die gemessenen Wassergehalte in allen drei Tiefen deutlich an. Ein ähnlicher

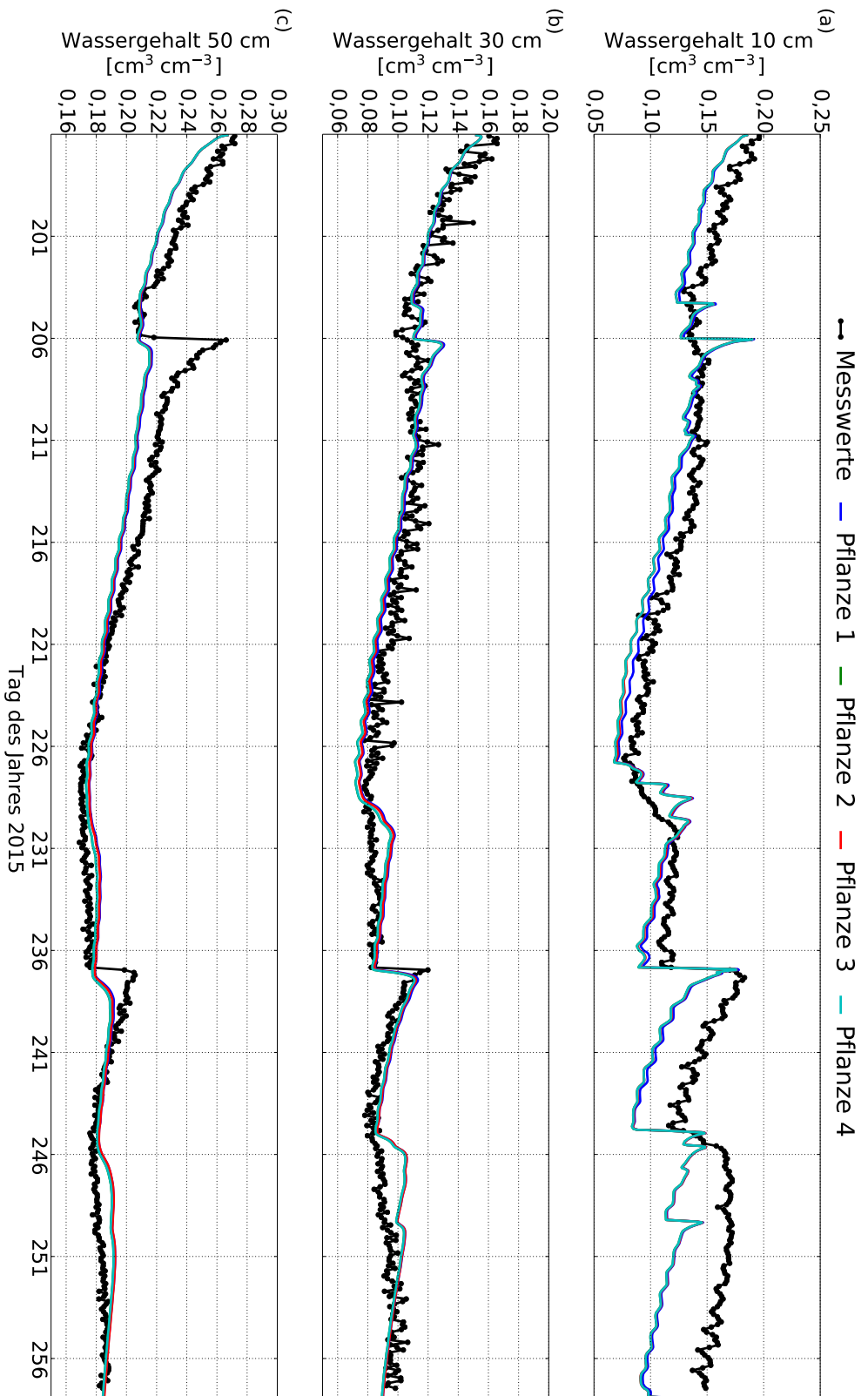


Abbildung 5.6: Zeitreihen der gemessenen und simulierten Bodenwassergerhalte [cm³ cm⁻³] im Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern in (a) 10 cm, (b) 30 cm und (c) 50 cm Tiefe von 15. Juli bis 15. September 2015. Die Messwerte (durchgezogene, schwarze Linien mit Punkten) sind dreistündliche Mittelwerte der drei Messgeräte, die sich in jeder Tiefe befanden. Die Modellergebnisse (durchgezogene, farbige Linien) sind in die vier Einzelpflanzen-Simulationen aufgeschlüsselt.

Tabelle 5.5: Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten im Zeitraum 15. Juli bis 15. September 2015 (jeweils 492 Wertepaare). Die nummerierten Spalten stehen für die vier Einzelpflanzen-Simulationen.

IA					NSE			
1	2	3	4	Tiefe	1	2	3	4
0,58	0,60	0,60	0,60	10 cm	0,01	-0,00	0,00	-0,00
0,83	0,81	0,82	0,81	30 cm	0,46	0,38	0,42	0,38
0,81	0,83	0,81	0,83	50 cm	0,55	0,59	0,55	0,59

Anstieg des Bodenwassergehaltes wurde in 10 cm und 30 cm Tiefe simuliert, während die Simulationen des Bodenwassergehaltes in 50 cm Tiefe im Vergleich zur Messung nur einen geringeren, und zeitlich verzögerten Anstieg zeigen.

Ein weiterer Tag mit viel Niederschlag (mehr als 10 mm d^{-1}) war der 25. Juli (DOY 206). Erwartungsgemäß erhöhte sich der simulierte Bodenwassergehalt zunächst vor allem in 10 cm Tiefe, im weiteren Verlauf des Tages auch geringfügig in den anderen Bodenschichten. Gemessen wurde dieser Anstieg vor allem in 50 cm Tiefe, jedoch nur von Messgerät 1 und 3, während der von Messgerät 2 gemessene Bodenwassergehalt nur in 10 cm Tiefe geringfügig anstieg (Abbildung 3.6). Diese Messwerte könnten u. a. durch präferentielle Fließbahnen (Dekker und Ritsema 1996; Flury u. a. 1994; Mossadeghi-Björklund u. a. 2016; Weiler 2016) zu Stande gekommen sein. So bilden sich vor allem in sehr trockenen Böden Risse durch die das Regenwasser sehr schnell in tiefere Bodenschichten abfließen kann während weniger Wasser in den Oberboden einsickert. Da präferentielle Fließbahnen im Bodenwasserflussmodell nicht berücksichtigt werden weichen an diesem Tag Messung und Simulation des Bodenwassergehaltes in 50 cm Tiefe deutlich voneinander ab.

Weitere Abweichungen zwischen Messung und Modell werden vor allem in 10 cm Tiefe ab dem 19. August (DOY 231) deutlich. In diesem Zeitraum unterschätzen die Simulationen die Messwerte, da sich die simulierten Bodenwassergehalte direkt nach Wassereintrag schneller und stärker erhöhen, aber im Anschluss daran auch deutlicher verringern als die gemessenen Bodenwassergehalte. In allen drei Tiefen weisen die Messwerte Tagesgänge auf. Diese sind in den Simulationsergebnissen schwächer ausgeprägt.

Die IA- und NSE-Werte der verschiedenen Einzelpflanzen-Simulationen (Tabelle 5.5) unterscheiden sich nur wenig voneinander. Ein Grund hierfür ist, dass sich die einzelnen Modellkonfigurationen nur in wenigen Eingabeparametern (Stängeldurchmesser, Blatt-

fläche, Pflanzenarchitektur) unterscheiden. In 10 cm Tiefe werden die Bodenwassergehalte nicht zufriedenstellend vom Modell abgebildet (NSE ca. 0, IA ca. 0,6), wobei die NSE-Werte der Simulationen von Pflanze 1 und 3 ein wenig größer als Null sind. Diese NSE-Werte liegen dennoch im selben Bereich wie jene, die von Stumpff u. a. (2012) im Rahmen einer Lysimeterstudie berechnet wurden.

In den beiden anderen Tiefen hingegen werden die Messwerte besser von den Simulationen abgebildet. Dies spiegelt sich in den statistischen Parametern wider (IA größer 0,8, NSE zwischen 0,38 und 0,46 in 30 cm bzw. zwischen 0,55 und 0,59 in 50 cm Tiefe). Herbst u. a. (2005) erreichten beim Test von verschiedenen Bodenwasserflussmodellen etwas höhere IA-Werte, während Rosa u. a. (2016) bei Simulationen der Bodenwassergehalte in einem Maisfeld mit dem HYDRUS-1D-Modell IA-Werte von knapp über 0,7 erlangten. Die in diesem Abschnitt präsentierten IA- und NSE-Werte der Bodenwassergehalte sind jenen, die im Rahmen der Lysimeter-Studie dieser Dissertation errechnet wurden (vgl. Abschnitt 5.1.3 und Heinlein u. a. 2017), sehr ähnlich.

Generell wird dadurch, dass sich die Wassergehalte, die von den verschiedenen Messgeräten aufgezeichnet wurden, stark unterscheiden, die Heterogenität des Bodens in Scheyern deutlich (vgl. Mrkonjic Fuka u. a. 2008; Sommer u. a. 2003). Hierdurch ergeben sich Schwierigkeiten beim Festlegen der bodenhydraulischen Parameter für die Simulation. Ebenso wird in diesem Fall das Hochskalieren der bodenhydraulischen Parameter auf die Feldskala erschwert, da hierfür je nach Heterogenität des Bodens seine hydraulischen Eigenschaften sehr detailliert und kleinräumig gemessen und ausgewertet werden müssten (Vereecken u. a. 2007).

5.2.2 Architekturen und Wasserpotential der Pflanzen

In Abbildung 5.7 sind die Architekturen der vier simulierten Pflanzen, die vom Xylemflussmodell berechnete Durchmesser der Zylinderelemente und das Wasserpotential des Xylems am ersten Simulationstag (15. Juli 2015) um 12:00 Uhr dargestellt. Die von Expert-N simulierten Wurzeln sind für alle Pflanzen identisch und auf diskrete Ebenen aufgeteilt, die an mehreren Stellen miteinander verbunden sind. Die unterste Wurzelebene liegt in 61 cm Bodentiefe, die anderen fünf Ebenen befinden sich zwischen 1 cm und 27 cm. Der minimale Durchmesser eines Wurzelementes beträgt 7,3 % des maximalen Stängeldurchmessers (siehe Abschnitt 4.3.2.4).

An den oberirdischen Pflanzenarchitekturen wird die Schwierigkeit des Laserscannens von Ackerpflanzen und der Auswertung dieser Laserscans deutlich. Stängel und Blätter wurden zwar prinzipiell richtig erfasst, jedoch fehlen je nach Pflanze zwischen 0,5 m und

1,5 m Höhe einzelne Blätter oder sind kürzer als in Realität. Auch ist die Krümmung des Stängels besonders bei Pflanze 3 etwas stärker als man erwarten würde.

Gründe hierfür sind einerseits der Messprozess selbst und andererseits der Auswertalgorithmus, der aus einer Punktwolke (Abbildungen 3.11d und 3.11d) die Pflanzenarchitekturen generiert. Dieser Algorithmus funktioniert sehr gut, um Bäume abzubilden (Hentschel u. a. 2013). Die Punktwolken von blattfreien Bäumen zeichnen sich dadurch aus, dass entlang des breiten Stamms viele Punkte vorhanden sind und bei den abzweigenden Ästen weniger Punkte. Diese Punkthäufigkeit wird bei der Generierung der Pflanzenarchitektur entsprechend gewichtet. Bei Maispflanzen hingegen weisen auch die Blätter im Vergleich zum Stängel viele Messpunkte auf, weshalb die Maisstängel vom Algorithmus nicht sehr geradlinig abgebildet werden. Die entsprechende Kante wird zu stark in Richtung Blatt gewichtet (Abbildungen 3.11e und 3.11e). Dies erforderte dementsprechend eine manuelle Nachbearbeitung der Maispflanzen-Architekturdaten.

Die Laserscan-Messung selbst ist zwar zerstörungsfrei, aber um die Saftfluss- und Dendrometermessung nicht durch das Entfernen benachbarter Pflanzen zu stören (ungehinderte Sicht von den vier Scanpositionen auf die jeweilige Pflanze), wurde die Laserscan-Messung erst kurz vor der Ernte durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt waren jedoch ein Teil der Blätter schon abgeknickt und vertrocknet. Das Entfernen der umliegenden Pflanzen hatte zusätzlich zur Folge, dass die nun frei stehenden Pflanzen windanfälliger waren und weniger beschattet wurden. Bei hoher Solarstrahlung und hohen Temperaturen führte dies zum Absenken weiterer Blätter innerhalb von einer Stunde und weniger.

Die vom Modell berechneten minimalen Durchmesser der oberirdischen Pflanzenteile lagen zwischen 3,4 cm (Pflanze 1) und 4,6 cm (Pflanze 4). Dieser minimale Durchmesser hängt einerseits vom angegebenen, maximalen Durchmesser und andererseits von der Anzahl der Verzweigungen ab. Da Pflanze 4 deutlich weniger Verzweigungen als die anderen drei Pflanzen aufweist, ist auch ihr minimaler, modellierter Durchmesser entsprechend höher.

Am 15. Juli 2015 um 12:00 Uhr liegen die minimalen, errechneten Wasserpotentiale im Xylem der vier Pflanzen bei $-1,27$ MPa, $-1,12$ MPa, $-1,21$ MPa und $-1,12$ MPa. Bei allen Pflanzen verringern sich die errechneten Xylem-Wasserpotentiale mit zunehmender Höhe sowie entlang der Blätter mit zunehmendem Abstand vom Stängel. Innerhalb der oberirdischen Biomasse sind die Unterschiede der Wasserpotentiale deutlich höher als in den Wurzeln. Da die Wurzeln einen sehr geringen Gradienten des Wasserpotentials aufweisen, ist das Xylem-Wasserpotential an der Bodenoberfläche fast so hoch wie

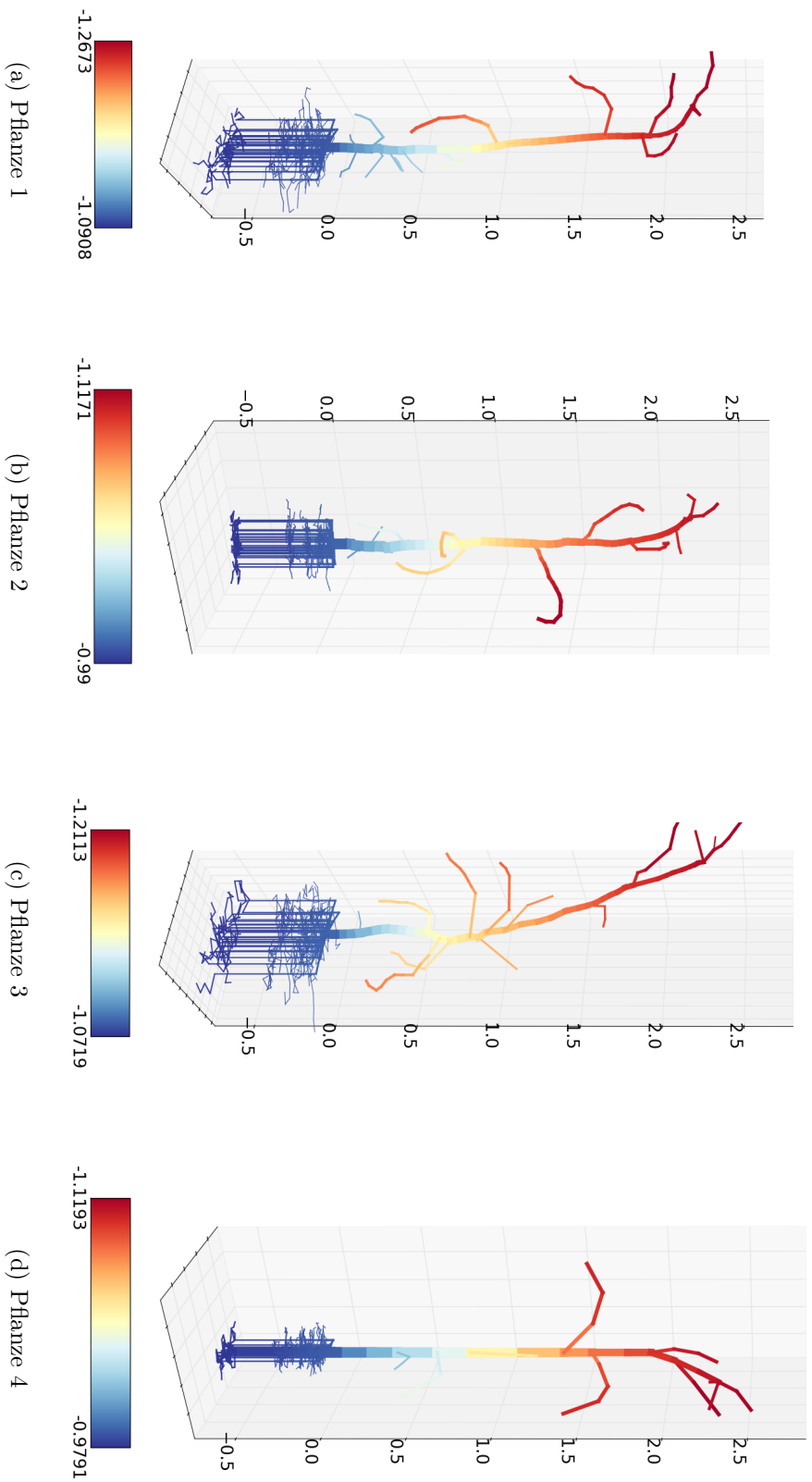


Abbildung 5.7: Architekturen der vier Maispflanzen. Der oberirdische Teil ist durch terrestrische Laserscans gemessen, der unterirdische Teil von Expert-N generiert und für alle vier Pflanzen identisch. Die Stärke der Linie spiegelt den vom Modell berechneten Durchmesser wider. Die Farben stellen das Wasserpotential der Xylemelemente [MPa] am 15. Juli 2015 um 12:00 Uhr dar.

das höchste Xylem-Wasserpotential der gesamten Pflanze. Dieses wurde in der untersten Wurzelebene simuliert und beträgt $-1,09$ MPa, $-0,99$ MPa, $-1,07$ MPa und $-0,98$ MPa (Pflanze 1 - 4). Der Potentialunterschied innerhalb der Pflanze ist zu diesem Zeitpunkt bei Pflanze 1 ($0,1765$ MPa) am größten und bei Pflanze 2 ($0,1271$ MPa) am kleinsten.

Die Wasserpotentiale dieser Maispflanzen liegen innerhalb des Bereiches von 0 MPa bis $-3,3$ MPa, den Bittner u. a. (2012a) bei der Simulation des Wasserflusses in Esche, Linde und Buche mit demselben Modell an einem Tag mit sehr hoher potentieller Transpiration errechneten. Die Gradienten der Wasserpotentiale innerhalb ihrer simulierten Bäume sind allerdings deutlich höher als in dieser Studie von Maispflanzen. Bohrer u. a. (2005) modellierten bei ihrer Simulation des Wasserflusses je nach Astdicke und Bereich im Baum um 12:00 Uhr Wasserpotentiale von ca. $-2,1$ MPa bis knapp unter 0 MPa. Marques u. a. (2016) maßen 75 Tage nach der Aussaat Wasserpotentiale im Blattxylem von Maispflanzen. Je nach Bewässerungszustand und Zugabe von Kalziumsilikat lagen diese zwischen $-4,2$ MPa und $-0,5$ MPa. Die von Tyree u. a. (1986) gemessenen Wasserpotentiale schwankten im Lauf eines Tages zwischen maximal 0 MPa nachts und minimal $-1,0$ MPa bei Trockenstress bzw. $-1,8$ MPa bei ausreichender Wasserzufuhr.

5.2.3 Saftfluss und Transpiration

Der zwischen Mitte Juli und Anfang Oktober gemessene und modellierte Saftfluss der vier Maispflanzen auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Alle Messwerte und Simulationen weisen deutliche Tagesgänge auf.

Der in Pflanze 1 gemessene, durchschnittliche Saftfluss erreicht maximal $23,5$ cm h^{-1} im Juli, und $16,0$ cm h^{-1} im August. Zwischen Ende August und dem Ende des Messzeitraums wurden Tagesmaxima im Bereich von $1,0$ cm h^{-1} bis $7,0$ cm h^{-1} gemessen. Die nächtlichen Saftflussraten lagen an den meisten Tagen zwischen $0,5$ cm h^{-1} und $2,0$ cm h^{-1} . Der Saftfluss in Pflanze 2 war zu Beginn der Messperiode etwas höher als der von Pflanze 1 (maximal etwas über $25,0$ cm h^{-1}). Im August nahm das Tagesmaximum des Saftflusses von ca. $18,0$ cm h^{-1} auf $8,0$ cm h^{-1} ab. Mitte September erreichte der Saftfluss maximal $4,0$ cm h^{-1} , an manchen Tagen aber auch nur weniger als $1,0$ cm h^{-1} . Nachts wurde meistens nur sehr wenig Saftfluss gemessen, in den Nächten nach dem 17. und 24. Juli (DOY 198 und 205) hingegen lag die Saftflussrate bei ca. $2,0$ cm h^{-1} . Der gemessene Saftfluss von Pflanze 3 war mit Ausnahme von zwei Ausreißern nach oben am 22. Juli und 6. August (DOY 203 und 218) deutlich niedriger als der von den ersten beiden Pflanzen. So lagen die Tagesmaxima gegen Anfang der Messperiode zwischen

5,0 cm h⁻¹ und 18,0 cm h⁻¹, während die nächtlichen Saftflussraten gering waren. Ab dem 25. August (DOY 237) wurden bis Anfang Oktober tägliche Maxima des Saftflusses von ca. 2,0 cm h⁻¹ bis 8,0 cm h⁻¹ gemessen. Auch nachts betrug der gemessene Saftfluss häufig 1,0 cm h⁻¹ und mehr. Während der in Pflanze 4 gemessene Saftfluss im Juli nur knapp 16,0 cm h⁻¹ überschritt, wurden Anfang August maximale Saftflussraten von über 20,0 cm h⁻¹ gemessen. Ende August lagen die Tagesmaxima des Saftflusses in der Regel zwischen 5,0 cm h⁻¹ und 13,0 cm h⁻¹. Auch im September betrug der gemessene Saftfluss noch regelmäßig mehr als 7,0 cm h⁻¹. Bei Pflanze 4 lag der nächtliche Saftfluss anfänglich bei maximal 2,0 cm h⁻¹, zum Ende der Messperiode schwankte er zwischen 1,0 cm h⁻¹ und 2,0 cm h⁻¹.

Die Tagesmaxima des modellierten Saftflusses von Pflanze 1 lagen zu Beginn des Simulationszeitraums zwischen 15,0 cm h⁻¹ und 20,0 cm h⁻¹ und nahmen bis Ende August auf etwa 7,0 cm h⁻¹ ab. Im September und Oktober wurden Tagesmaxima der Saftflussraten von knapp unter 1,0 cm h⁻¹ bis 3,5 cm h⁻¹ simuliert. Im Juli und August war der simulierte Saftfluss von Pflanze 2 höher als der von Pflanze 1. Hier erreichte das Tagesmaximum des Saftflusses des Öfteren mehr als 20,0 cm h⁻¹. Gegen Ende des Simulationszeitraums wurden jedoch nur selten Tagesmaxima von mehr als 2,5 cm h⁻¹ simuliert. In der 3. Simulation lagen die Tagesmaxima des Saftflusses im Juli zwischen 13,0 cm h⁻¹ und 21,5 cm h⁻¹. Am 2. August (DOY 214) erreichte der simulierte Saftfluss ebenfalls einen Wert von über 20,0 cm h⁻¹, während an den restlichen Tagen im August das tägliche Maximum des Saftflusses zwischen 3,0 cm h⁻¹ und 17,0 cm h⁻¹ schwankte. Im weiteren Simulationszeitraum war der Saftfluss gering, die modellierten Tagesmaxima reichen von 0,3 cm h⁻¹ bis 5,0 cm h⁻¹. Von Mitte Juli bis Mitte August schwanken die maximalen, simulierten Saftflussraten von Pflanze 4 nur wenig. Sie liegen zwischen 10,0 cm h⁻¹ und 17,0 cm h⁻¹. Auch hier nehmen die Tagesmaxima zum Ende des Simulationszeitraums ab. Sie betragen Ende August ca. 5,0 cm h⁻¹ und ab Mitte September weniger als 1,0 cm h⁻¹. In allen vier Modellrechnungen wird an den meisten Tagen kein nächtlicher Saftfluss simuliert. Eine Ausnahme ist die Nacht vom 27. auf den 28. August (DOY 208 auf 209), in der die simulierten Saftflussraten ca. 1,0 cm h⁻¹ betragen.

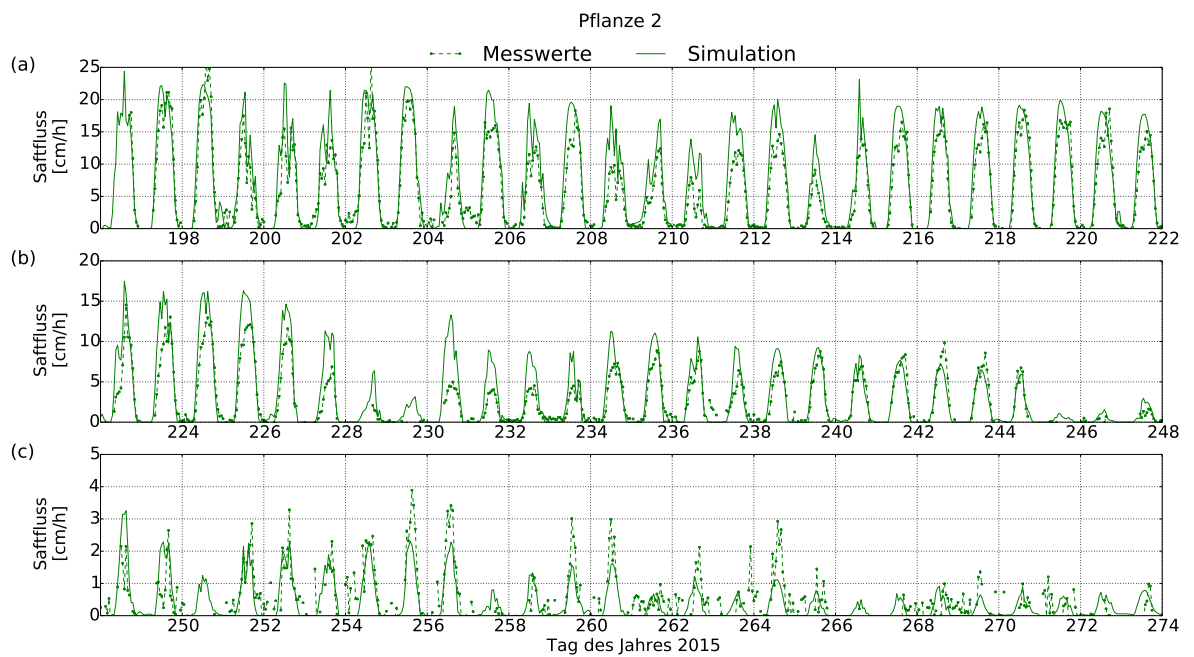
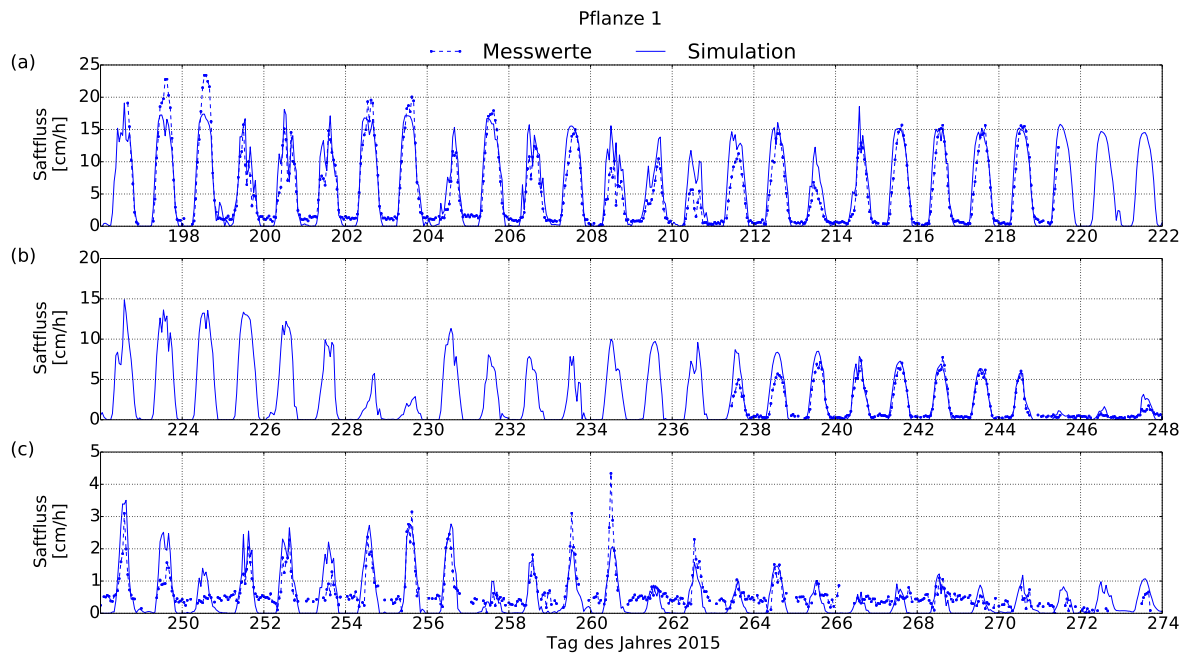
An einigen Tagen, z. B. 19. - 21., 25., und 27. - 29. Juli (DOY 200 - 202, 206, und 208 - 210) wurden deutliche Verringerungen des Saftflusses zur Mittagszeit gemessen. Dies sind Tage an denen die Solarstrahlung mittags deutliche Einbrüche aufweist, während die relative Luftfeuchte im Vergleich zu anderen Tagen nicht so weit absinkt. Beide Variablen schwanken an diesen Tagen außerdem stark. (Abbildung 3.8). Diese mittäglichen Einbrüche der Saftflussraten sind an denselben Tagen ebenfalls in den Si-

mulationen zu erkennen. Allerdings wurde z. B. auch am 15. - 16. und 30. - 31. Juli sowie am 2. August (DOY 196 - 197, 211 - 212 und 214) zur Mittagszeit ein leichter Rückgang des Saftflusses simuliert, der in den Messungen überhaupt nicht oder nicht so deutlich hervortritt. Gleichzeitig schwankt auch an diesen Tagen mittags die Solarstrahlung, jedoch nicht ganz so stark wie an den Tagen, an denen der gemessene Saftfluss zur Mittagszeit einbrach. Während der gemessene Saftfluss also von sehr kurzen Schwankungen der Strahlung weniger beeinflusst wird, reagiert das Modell sofort auf kleinste Änderungen aufgrund der strahlungsabhängigen Simulation der potentiellen Evapotranspiration (vgl. Gleichung 4.7). Diese Änderungen pflanzen sich über die potentielle Transpiration bis zur aktuellen Transpiration und somit zum modellierten Saftfluss fort. Dieses Phänomen, dass sich der simulierte Saftfluss zur Mittagszeit verringert, nicht aber der gemessene, trat ebenfalls bei Bittner u. a. (2012b) auf, die mit demselben Modell den Wasserfluss in Buchen simulierten. Demzufolge sollte das kritische Potential, das im Modell das Schließen der Stomata bewirkt (vgl. Bohrer u. a. 2005), zusätzlich angepasst werden.

Die niedrigeren, gemessenen und simulierten Saftflussraten gegen Ende der Messperiode sind einerseits auf die Verringerung der grünen Blattfläche zurückzuführen, andererseits darauf, dass die Solarstrahlung und die Temperaturen im September deutlich niedriger waren als zu Beginn der Messperiode, während die relative Luftfeuchte gegen Ende höher war.

Der Zusammenhang zwischen Saftfluss bzw. Transpiration von Mais mit Solarstrahlung und Blattfläche wurde u. a. im Rahmen von Messkampagnen in Iowa (USA) im Sommer 2009 (Xiao u. a. 2016) und in Nordwest-China in den Jahren 2013 und 2014 (Jiang u. a. 2016) untersucht. Die Abhängigkeit der Mais-Transpiration vom Sättigungsdefizit wurde mithilfe von Feldstudien (Cavero u. a. 2009) und Klimakammer-Experimenten (Gholipour u. a. 2012; Yang u. a. 2012) analysiert. Gong u. a. (2006) untersuchten die Sensitivität der Penman-Monteith Evapotranspiration bezüglich der darin vorkommenden Wetterdaten. Dabei fanden sie heraus, dass ein hoher Wert der Solarstrahlung zu hohen Evapotranspirationsraten führt, während die relative Luftfeuchte stark negativ mit der berechneten Evapotranspiration korreliert ist.

In den ersten zwei Simulationstagen unterschätzt das Modell bei Pflanze 1 die Messwerte. Danach stimmen die Simulation und die Messung in der Regel gut überein, jedoch gibt es Tage mit Niederschlag und prinzipiell geringerem Saftfluss wie den 27. - 30. Juli, sowie den 1. und 25. - 26. August (DOY 208 - 211, 213, 237 - 238) an denen die Simulationsergebnisse höher als die Messung sind. Bei anderen Anwendungen dieses



5.2 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes

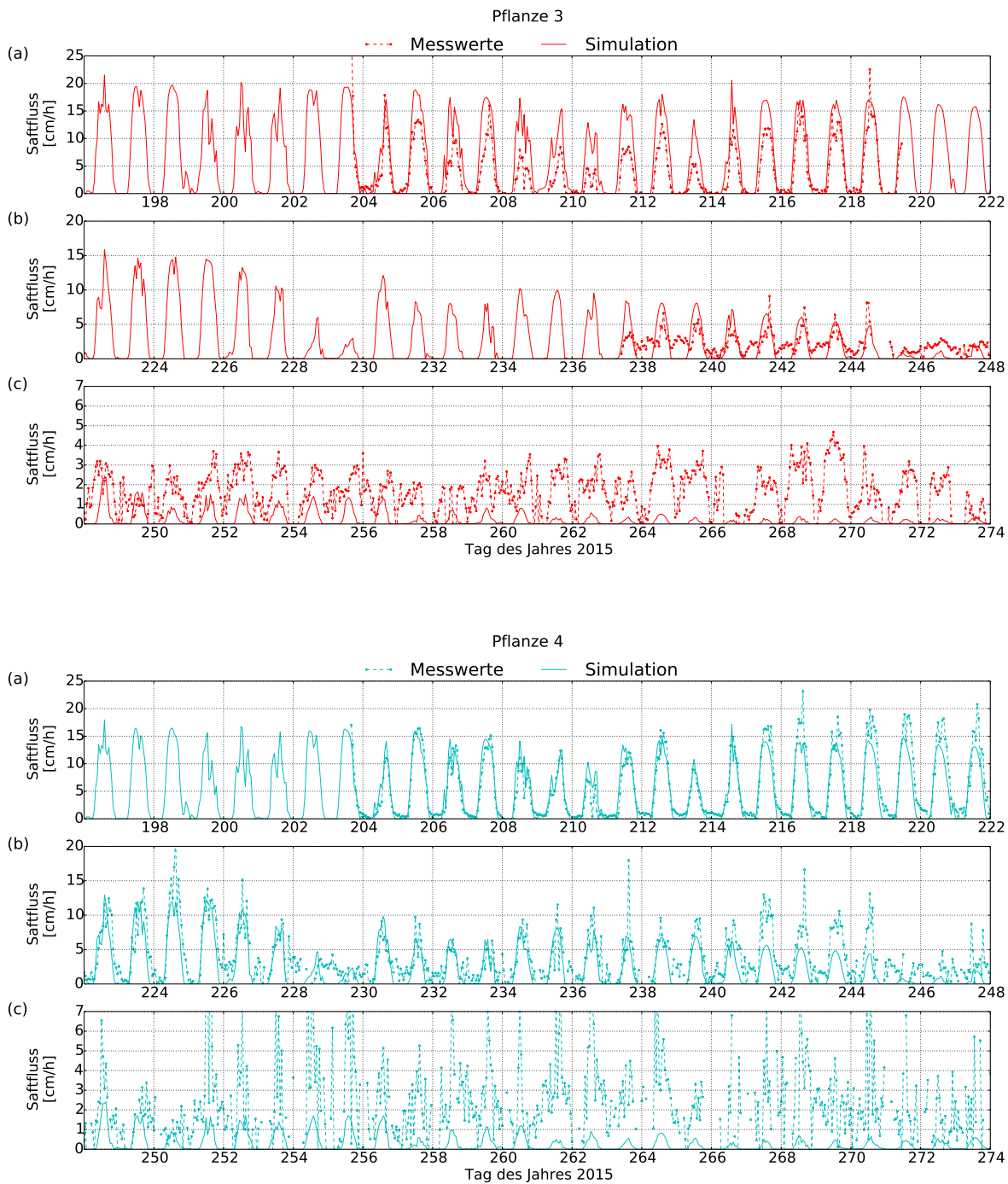


Abbildung 5.8: Gemessener (gestrichelte Linien Punkten) und modellierter (durchgezogene Linien) Saftfluss [cm h^{-1}] der Pflanzen 1 (blau), 2 (grün), 3 (rot), und 4 (hellblau) auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern. Der Zeitraum von 15. Juli bis 1. Oktober 2015 ist jeweils in drei Teile aufgeteilt: (a) 15. Juli bis 10. August (b) 10. August bis 5. September (c) 5. September bis 3. Oktober. Die Messwerte sind Mittelwerte der inneren und äußeren Saftflussmessung, bei den Pflanzen 1 und 3 wurde die untere Messung verwendet.

Tabelle 5.6: Indizes of Agreement (IA) und Nash-Sutcliffe-Modelleffizienzen (NSE) zwischen gemessenem und simuliertem Saftfluss im Zeitraum 15. Juli bis 1. Oktober 2015. Die Zahlen in Klammern geben jeweils die Parameter für den Zeitraum 15. Juli bis 5. September 2015 (Abbildung 5.8 a und b) an.

Pflanze	Wertepaare	IA	NSE
1	1200	0,97	0,85
2	1328	0,95	0,76
3	1244 (622)	0,86 (0,87)	0,19 (0,25)
4	1525 (1021)	0,89 (0,92)	0,60 (0,72)

Xylemflussmodells wurde ebenfalls der Saftfluss von Buchen leicht überschätzt sofern er gering war (Bittner u. a. 2012b; Hentschel u. a. 2013).

An anderen Tagen mit vergleichsweise hoher Solarstrahlung wie dem 16. - 17. und 19. September (DOY 259 - 260 und 262) war der simulierte Saftfluss niedriger als der gemessene (Abbildung 3.8). Bei Pflanze 2 stimmen simulierter und gemessener Saftfluss gut überein. Insbesondere im August gibt es jedoch eine Tendenz zur Überschätzung der Saftflussraten durch das Xylemflussmodell und ab September eine leichte Tendenz zur Unterschätzung. Als Beispieltage können hier dieselben Tage wie bei Pflanze 1 genannt werden, jedoch treten bei Pflanze 2 Über- und Unterschätzungen insgesamt deutlich häufiger auf. Von Ende Juli bis Ende August liegt der simulierte Saftfluss bei Pflanze 3 grundsätzlich oberhalb des gemessenen. Von Anfang September bis zum Simulationseende hingegen unterschätzt das Modell den gemessenen Saftfluss deutlich, an einigen Tagen, z. B. 25. - 26. September (DOY 268 - 269) sogar um bis zu einen Faktor 10. Bis zum 2. August (DOY 214) stimmen die gemessenen und simulierten Saftflussraten bei Pflanze 4 gut überein. Danach wurde an den meisten Tagen ein im Vergleich zur Simulation höherer Saftfluss gemessen. Ähnlich wie bei Pflanze 3 ist auch hier die Unterschätzung des Saftflussraten durch das Modell im September sehr deutlich.

Bei allen vier Simulationen steigt der simulierte Saftfluss vormittags etwas schneller an als die Messwerte, die Abnahme des Saftflusses am Nachmittag wird hingegen zeitlich korrekt simuliert. Ein leichter zeitlicher Versatz zwischen Messung und Simulation ist ebenfalls in den Studien von Bittner u. a. (2012b) und Hentschel u. a. (2013) zu erkennen. Der Grund hierfür kann an dem etwas zu schnellen Anstieg der simulierten, potentiellen Evapotranspiration zu Tagesbeginn liegen. Dieser zeitliche Versatz ist an einzelnen Tagen auch in den Ergebnissen der Lysimeter-Studie zu erkennen (vgl. Abbildung 5.1).

Ähnlich wie bei der Lysimeter-Studie dieser Dissertation (Abschnitt 5.1.1 und Heinlein u. a. 2017) wird der nächtliche Saftfluss grundsätzlich vom Modell unterschätzt, da keine oder nur wenig nächtliche potentielle Evapotranspiration/Transpiration simuliert werden.

Der Zusammenhang zwischen Einzelpflanzen-Simulation und gemessenem Saftfluss wird auch über die IA- und NSE-Werte (Tabelle 5.6) deutlich. Die IA-Werte von Pflanze 1 und 2 sind etwas höher als die IA-Werte von Pflanze 3 und 4. Bei den NSE-Werten wird dieser Unterschied noch deutlicher. Insbesondere bei Pflanze 3 ist der NSE-Wert aufgrund der systematischen Unterschätzung der Saftflussraten durch das Modell niedrig. Die statistischen Parameter für Pflanze 1, 2 und 4 liegen im selben Bereich oder darüber wie diejenigen der Lysimeter-Simulation (Tabelle 5.1 und Heinlein u. a. 2017). Bei Saftfluss-Simulationen in Buchen mit demselben Xylemfluss-Modell errechneten Hentschel u. a. (2013) NSE-Werte zwischen -0,64 und 0,83. Da die Messwerte von Pflanze 3 und 4 im September und Oktober vergleichsweise stark oszillierten, wurden zusätzlich IA- und NSE-Werte ohne diesen Zeitraum berechnet. Dies führt bei beiden Pflanzen zu einer Erhöhung der statistischen Parameter. Dies verstärkt den Eindruck bei der Betrachtung von Abbildung 5.8, dass die Simulation und die Messung des Saftflusses bei Pflanze 3 und 4 zwischen 15. Juli und 5. September 2015 deutlich besser zusammenpassen als zwischen 5. September und 1. Oktober 2015.

Eine generelle Unsicherheit bei den Simulationen des Xylemwasserflusses entsteht durch die Festlegung der potentiellen Transpiration mithilfe des Blattflächenindex. Diese Unsicherheiten sind einerseits durch die Angabe der gemessenen Blattfläche, insbesondere bei Pflanze 2 und 4, deren Blattfläche als Mittelwert der Blattfläche von Pflanze 1 und 3 angenommen wurde, bedingt, aber andererseits auch durch die vergleichsweise einfache Berechnung der zeitlichen Entwicklung des Blattflächenindex mithilfe von Gleichung 4.9. Bei Simulationen mit weniger komplexen Transpirationsmodellen (Abschnitt 5.1, Heinlein u. a. 2017; Van Griensven u. a. 2014) wurde ebenfalls die Wichtigkeit einer korrekten Repräsentation des Blattflächenindex gezeigt.

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen Modell und Messung ist die Annahme einer einheitlichen Wurzelverteilung und eines einheitlichen Bodens für alle simulierten Pflanzen. So sind z. B. die gemessenen Wassergehalte je nach Position des Messgeräts stark unterschiedlich (Abbildung 3.6) und auch die Wurzelverteilung kann bei jeder Pflanze verschieden sein (vgl. Abbildung 3.15). Auch haben Pflanzen die Fähigkeit, die Wurzelwasseraufnahme an die lokale Wasserverfügbarkeit anzupassen (Clothier und Green 1994). Unterschätzungen des Saftflusses durch das Modell könnten z. B.

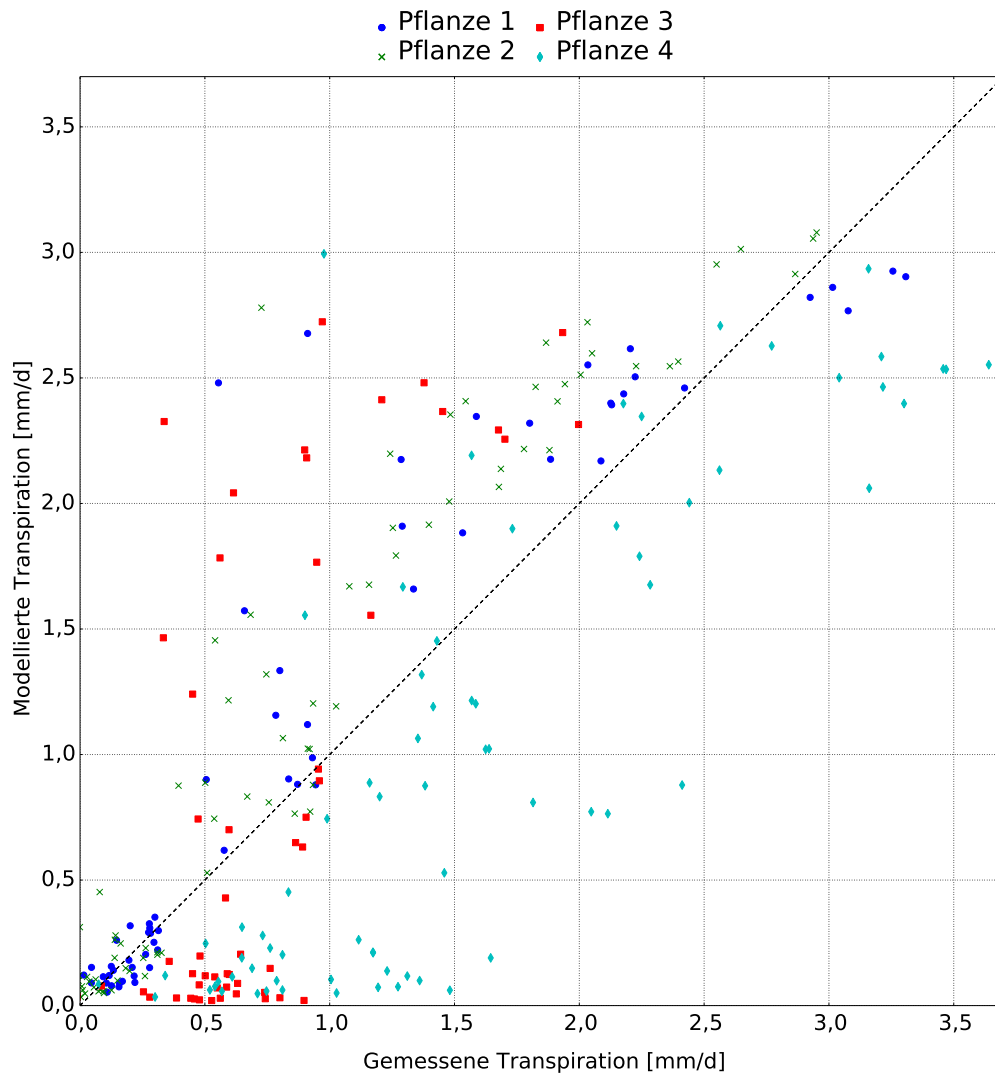


Abbildung 5.9: Streudiagramm der täglichen gemessenen (x-Achse) und modellierten (y-Achse) Transpiration [mm d^{-1}] der Maispflanzen 1 (blaue Punkte), 2 (grüne Kreuze), 3 (rote Quadrate) und 4 (hellblaue Rauten) auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern von 15. Juli bis 1. Oktober 2015. Die Messwerte wurden aus den Mittelwerten der inneren und äußeren Saftflussmessung und dem Stängeldurchmesser auf dieser Höhe errechnet. Bei den Pflanzen 1 und 3 wurde die untere Messung verwendet. Die gestrichelte, schwarze Linie ist eine Ursprungsgerade.

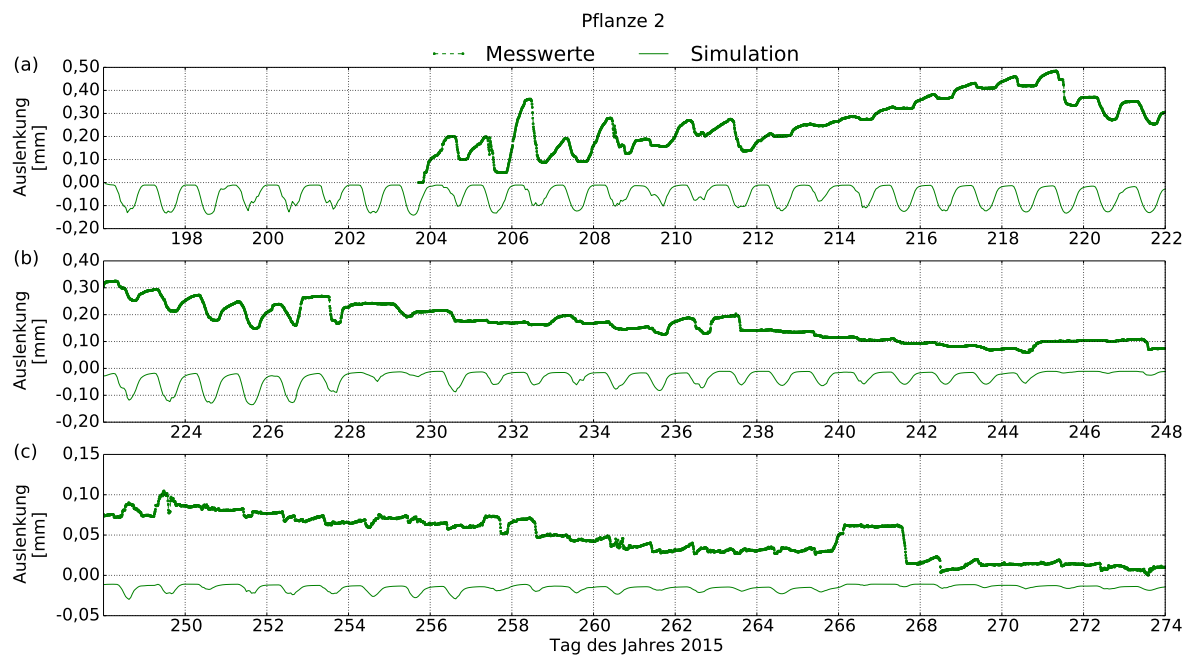
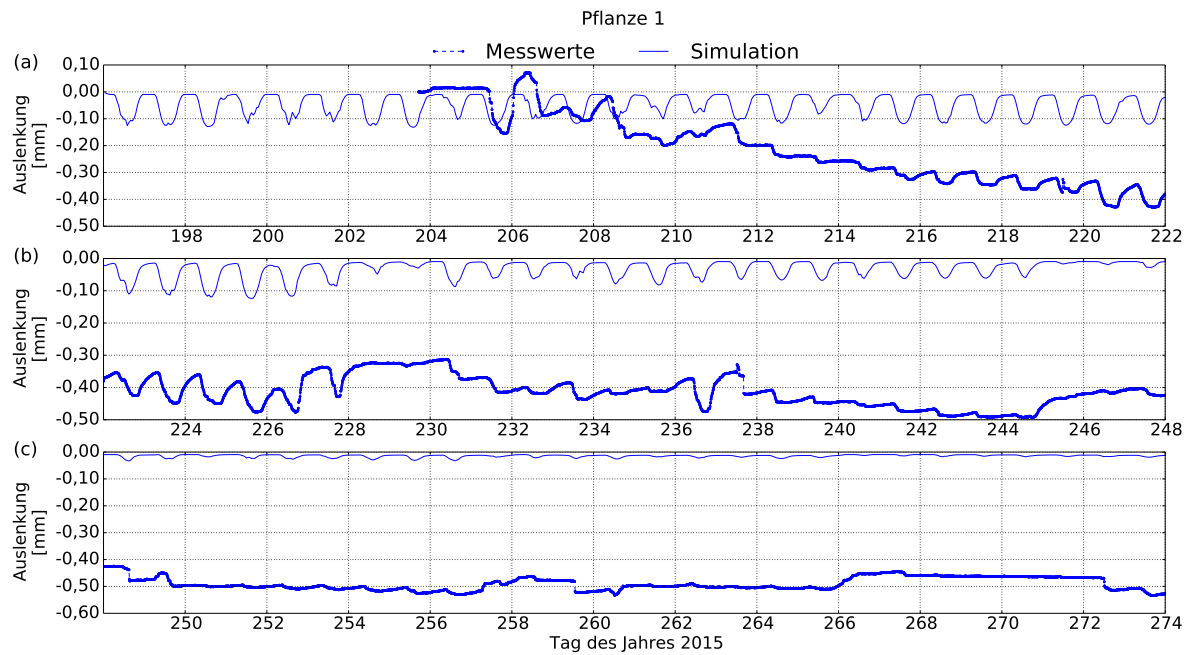
darauf beruhen, dass Wurzeln mancher Pflanzen in präferentielle Fließbahnen hineinreichen, während andere Pflanzen trotz eines Regenereignisses nur wenig Wasser zur Verfügung haben. Hierfür spricht, dass die Simulation des Saftflusses von Pflanze 1 die Messwerte im Juli und August nach Niederschlagsereignissen grundsätzlich überschätzt.

Bohrer u. a. (2005) wandten das Xylemflussmodell nur für oberirdische Pflanzenteile mit konstanten Wasserpotential an der Grenze zwischen Wurzel und Stamm an und simulierten realistische Transpirations- und Saftflusswerte, allerdings nur über einen Zeitraum von 40 Stunden. Auch bei Bittner u. a. (2012b) und in den Simulationen dieser Dissertation ist das Xylemwasserpotential innerhalb der Wurzeln vergleichsweise konstant (Abschnitt 5.2.2). Dennoch ist die Repräsentation der Wurzeln im Modell ein wichtiger Baustein für die vollständige Beschreibung der Wasserbilanz, da ansonsten keine Simulation des Wasseraustauschs zwischen Boden und Wurzeln möglich wäre.

Abbildung 5.9 ist ein Streudiagramm, das den Zusammenhang zwischen simulierter und gemessener, täglicher Transpiration zeigt. Die gemessene, tägliche Transpiration liegt zwischen 0 mm d^{-1} (Pflanze 2) und $3,65 \text{ mm d}^{-1}$ (Pflanze 4). Ähnliche tägliche Saftflussraten bei Mais (maximal $3,5 \text{ mm d}^{-1}$) wurden auch von Manderscheid u. a. (2015) in Niedersachsen gemessen, jedoch mit anderen Saftflusssensoren. Xiao u. a. (2016) wiederum maßen tägliche Transpirationsraten von bis zu $6,2 \text{ mm d}^{-1}$ in den USA.

Die Simulationswerte der täglichen Transpiration schwanken zwischen $0,02 \text{ mm d}^{-1}$ (Pflanze 3) und $3,1 \text{ mm d}^{-1}$ (Pflanze 2). Diese Werte sind verglichen mit anderen Modellstudien etwas niedriger. Rosa u. a. (2016) simulierten unter Verwendung des HYDRUS-1D Modells tägliche Transpirationssummen von bis zu 8 mm d^{-1} (2004) bzw. 6 mm d^{-1} (2006) in Portugal. Die tägliche Transpiration von Mais in den Simulationen von Wu u. a. (2015) erreicht maximal $5,5 \text{ mm d}^{-1}$ (2008) bzw. $5,0 \text{ mm d}^{-1}$ (2009).

Die täglichen Transpirationssummen von Simulation 1 und 2 stimmen an Tagen mit niedriger Transpiration (kleiner $0,5 \text{ mm d}^{-1}$) gut mit den Messungen überein. Höhere Transpirationsraten werden von diesen Simulationen häufig überschätzt. Liegt die gemessene, tägliche Transpiration über $2,5 \text{ mm d}^{-1}$, sind die Simulationswerte von Pflanze 2 etwas höher, die von Pflanze 1 hingegen etwas niedriger als die Messwerte. Bei Pflanze 3 ist der Zusammenhang zwischen gemessener und simulierter Transpiration nicht sehr deutlich. An vielen Tagen sind die gemessene und die simulierte Transpiration niedrig, aber an einzelnen anderen Tage wurde ein niedriger Transpirationswert (ca. $0,5 \text{ mm d}^{-1}$) gemessen, während die simulierte Transpiration größer als $2,0 \text{ mm d}^{-1}$ ist. Bei Pflanze 4 ist bis auf 10 Tage die modellierte Transpiration niedriger als die gemessene. Insbesondere wenn die simulierte Transpiration kleiner als $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ ist, schwanken die täglichen Messwerte vergleichsweise stark, von $0,1 \text{ mm d}^{-1}$ bis $1,7 \text{ mm d}^{-1}$. Der Trend, dass niedrige, tägliche Transpirationswerte von den Xylemfluss-Simulationen in Buchen leicht überschätzt wurden (Bittner u. a. 2012b; Hentschel u. a. 2013), ist in den Transpirationssimulationen von Mais nicht zu erkennen.



5.2 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes

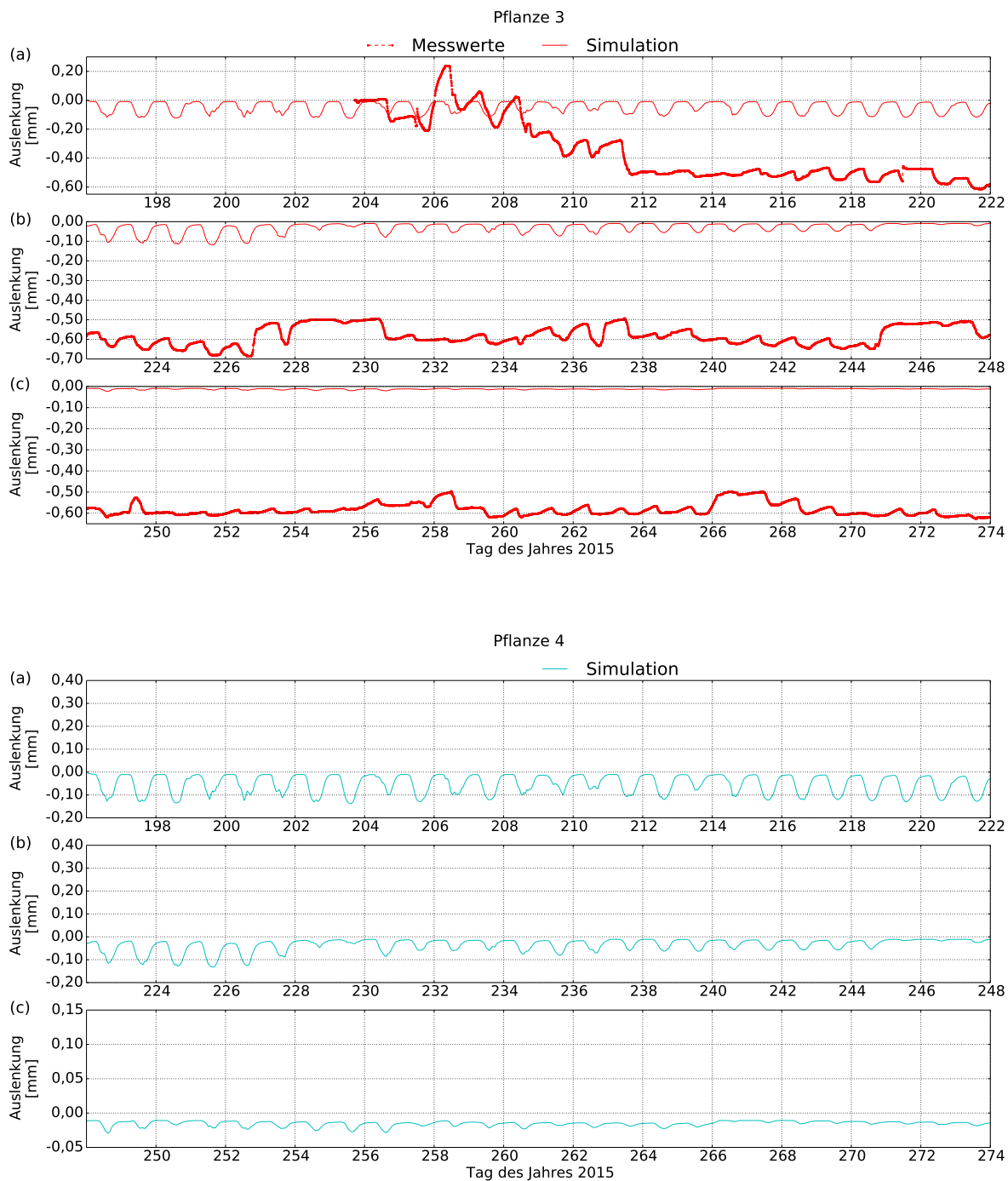


Abbildung 5.10: Gemessene (gestrichelte Linien mit Punkten) und modellierte (durchgezogene Linien) Schwankung des Stängeldurchmessers [mm] der Pflanzen 1 (blau), 2 (grün), 3 (rot), und 4 (hellblau) auf dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern. Der Zeitraum von 15. Juli bis 1. Oktober 2015 ist jeweils in drei Teile aufgeteilt: (a) 15. Juli bis 10. August (b) 10. August bis 5. September (c) 5. September bis 3. Oktober.

5.2.4 Stängeldurchmesser

Die im Sommer 2015 in Scheyern gemessenen und die aus den Simulationsergebnissen errechneten (vgl. Gleichung 4.17) Schwankungen der Stängeldurchmessers der vier Maispflanzen sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Die Änderungen des Stängeldurchmessers (im Vergleich zum Durchmesser bei Beginn der Messung bzw. der Simulation) weisen in den ersten 1,5 Monaten deutlich ausgeprägte Tagesgänge auf. Zum Ende der Simulationsperiode verringern sich die täglichen Amplituden.

Bis Mitte August (DOY 227) betragen die täglichen Schwankungen der simulierten Stängeldurchmesser maximal 0,12 mm (Pflanze 1, 2), 0,11 mm (Pflanze 3), und 0,13 mm (Pflanze 4). Im weiteren Verlauf des Monats bis zum 2. September (DOY 245) nehmen die simulierten Tagesamplituden des Stängeldurchmessers in etwa um die Hälfte ab. Im September und Anfang Oktober wurden dann nur noch sehr geringe Tagesschwankungen von maximal 0,02 mm simuliert.

Die täglichen Schwankungen der gemessenen Stängeldurchmesser können teilweise von den Simulationen abgebildet werden, allerdings ist in den Abbildung ein geringer zeitlicher Versatz zwischen Messung und Simulationsergebnis zu erkennen. Insbesondere vom 5. bis 16. August (DOY 217 - 228) sind sich die täglichen Schwankungsbreiten der Stängeldurchmesser, die aus der Messung und aus der Simulation ermittelt worden, sehr ähnlich. Im September ähneln sich die täglichen Schwankungen der jeweiligen Simulations- und Messergebnisse von Pflanze 1 und 2 ebenfalls, während bei Pflanze 3 im Vergleich zur Simulation deutlich größere tägliche Durchmesseränderungen gemessen wurden. Zu Beginn der Messperiode, vor allem am 25. Juli (DOY 206), wurden die Tagesamplituden der gemessenen Stängeldurchmesser durch das Modell deutlich unterschätzt. Die IA-Werte zwischen simulierter und gemessener täglicher Schwankungsbreite der Stängeldurchmesser betragen 0,75 (Pflanze 1), 0,82 (Pflanze 2) und 0,64 (Pflanze 3). Die NSE-Werte liegen bei 0,17 (Pflanze 1), 0,30 (Pflanze 2) und -1,11 (Pflanze 3).

Bei allen vier Zeitreihen der simulierten Stängeldurchmesser wird keinerlei Wachstum oder Rückgang der Stängeldurchmesser abgebildet. Im Gegensatz dazu nahmen die gemessenen Stängeldurchmesser der Pflanzen 1 und 3 ab dem 25. Juli (DOY 206) zunächst schnell und nach 10 bzw. 6 Tagen langsamer ab. Der Durchmesser des Stängels von Pflanze 2 vergrößerte sich hingegen zwischen 23. Juli und 7. August (DOY 204 - 219) und nahm ab dann bis zum Ende des Messzeitraums stetig ab.

Der Tagesgang der simulierten Stängeldurchmesser kann mit den Wetterdaten (Abbildung 3.8) und dem simulierten Saftfluss (Abbildung 5.8) in Verbindung gebracht werden. An Tagen mit vergleichsweise geringer Schwankung des simulierten Stängel-

durchmessers, z. B. 16. - 18. August sowie 2. September (DOY 228 - 230, 245), sind die Tagesamplituden von Temperatur und relativer Luftfeuchte gering, die maximale Solarstrahlung niedrig, und häufig findet Niederschlag statt. Gleichzeitig ist der simulierte Saftfluss niedrig. An den anderen Tagen zwischen 15. Juli und 1. September (DOY 196 und 244) waren die simulierten Tagesgänge der Stängeldurchmesser deutlich ausgeprägt. In diesem Zeitraum wurden hohe Saftflussraten simuliert und auch das Wetter war meistens durch große Tagesamplituden von Temperatur und relativer Luftfeuchte sowie durch hohe Strahlungswerte gekennzeichnet.

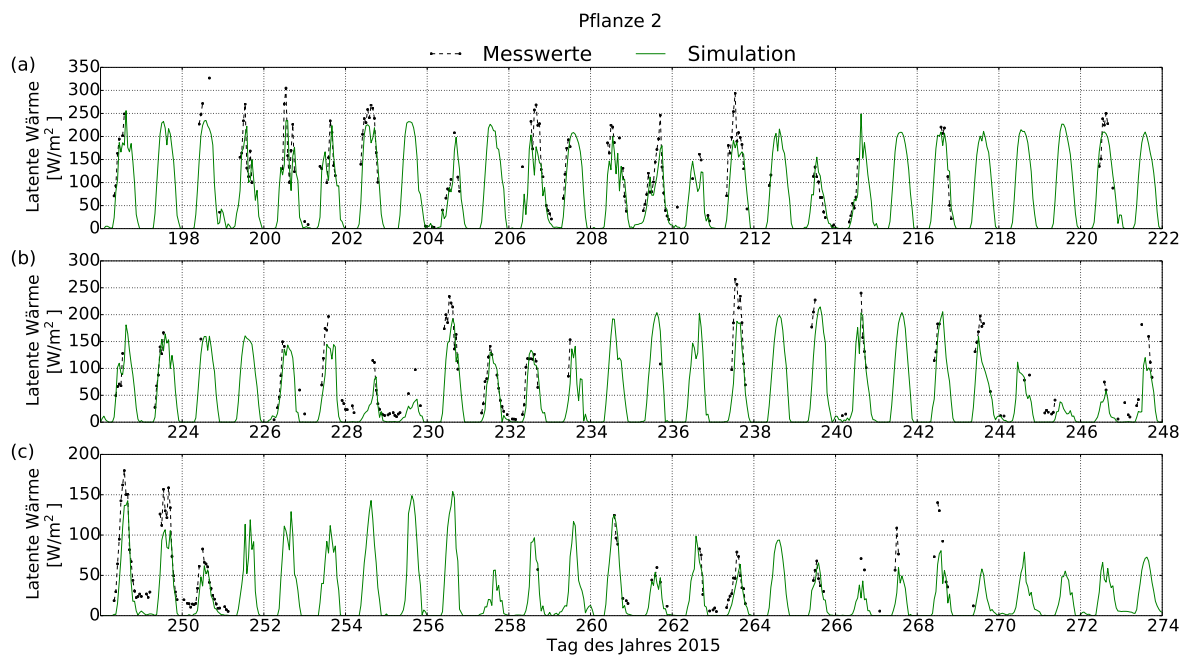
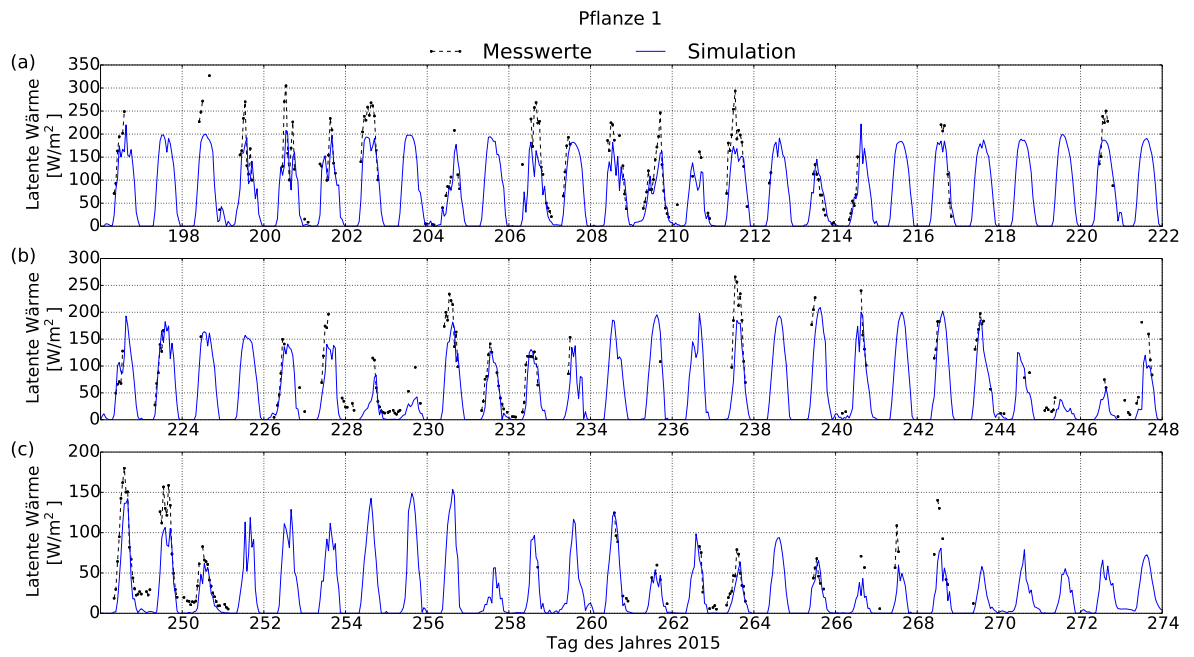
Somit bildet das Xylemflussmodell den Zusammenhang zwischen einerseits dem Wassergehalt im Xylem und andererseits dem Stängeldurchmesser realistisch ab. Dieser Zusammenhang wird im Modell über die Abhängigkeit des Xylemdurchmessers vom Xylemmatrixpotential (Gleichung 4.17) in Verbindung mit der Wasserretentionskurve (Gleichung 4.12) realisiert.

Steppe u. a. (2006) maßen Saftfluss und Stammdurchmesser einer zwei Jahre alten Buche (*Fagus sylvatica*) in 5-minütiger Auflösung. Zusätzlich parametrisierten sie zwei Modelle, die den Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern abbilden können. Ihre Simulationsergebnisse und Messungen der Stammdurchmesser waren sehr eng miteinander korreliert, ebenso ihre Saftflussmessungen und -simulationen. Weitere Mess- und Modellstudien konnten ebenfalls die Zusammenhänge zwischen der zeitlich hoch aufgelösten Änderung des Stammdurchmessers und der Transpiration von Bäumen illustrieren (Cocozza u. a. 2014; De Swaef u. a. 2015; Perämäki u. a. 2001).

5.2.5 Latenter Wärmefluss

Der zwischen Mitte Juli und Anfang Oktober gemessene und modellierte latente Wärmefluss aus dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Während eines repräsentativen Zeitraums im Sommer 2014 lag die Energiebilanzschließung der Eddy-Kovarianz-Messungen bei 81 % (Thieme 2017). Die Messwerte (falls vorhanden) und die Simulationen weisen deutliche Tagesgänge auf.

Der gemessene latente Wärmefluss erreicht Tagesmaxima von maximal 328 W m^{-2} im Juli, ca. 260 W m^{-2} im August und 180 W m^{-2} im September. Um die Messwerte mit der Simulation vergleichbar zu machen wurden die Messwerte mit schlechten Qualitätsflags und solche, deren Footprint nicht im Schlag A17 liegt (vgl. Abbildung 3.13), entfernt. Somit ergeben sich vergleichsweise große Datenlücken, insbesondere nachts. Falls nächtliche Messwerte vorhanden sind, wurden latente Wärmeflüsse von maximal 25 W m^{-2} gemessen.



5.2 Simulation des pflanzeninternen Wassertransportes

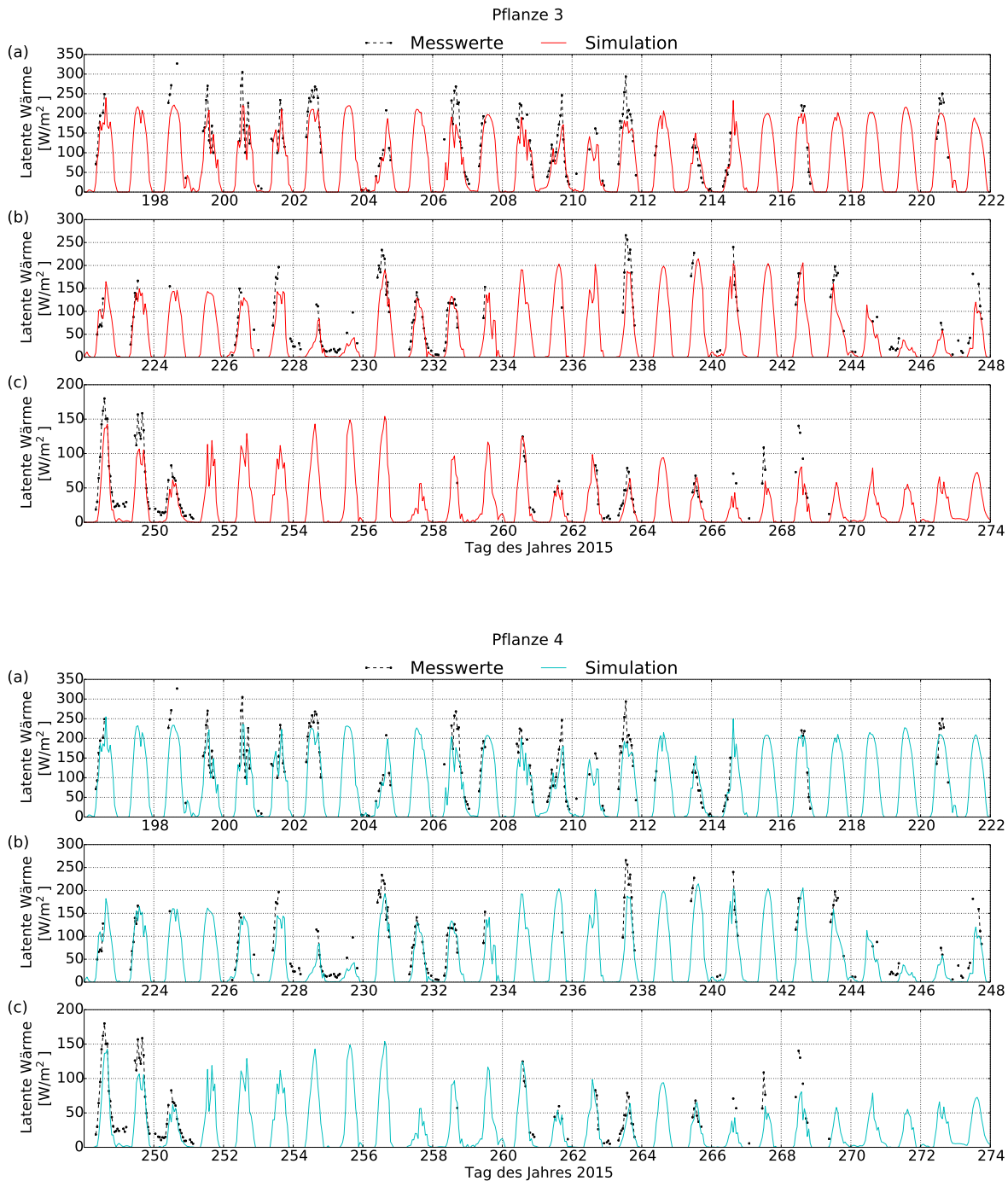


Abbildung 5.11: Latenter Wärmefluss [W m^{-2}] aus dem Schlag A17 der Forschungsplattform Scheyern. Der Zeitraum von 15. Juli bis 1. Oktober 2015 ist jeweils in drei Teile aufgeteilt: (a) 15. Juli bis 10. August (b) 10. August bis 5. September (c) 5. September bis 3. Oktober. Die Simulationen sind gemäß der Pflanzen 1 (blau), 2 (grün), 3 (rot), und 4 (hellblau) aufgeteilt. Die Messwerte (gestrichelte, schwarze Linien mit Punkten) sind in jeder Abbildung identisch.

Der prinzipielle Verlauf der modellierten Tagesgänge des latenten Wärmeflusses ist sich in allen vier Simulationen ähnlich. Jedoch gibt es Unterschiede in der Höhe der Tagesmaxima. So erreichte der latente Wärmefluss in den Simulation 1 bis 4 maximal 210 W m^{-2} , 255 W m^{-2} , 245 W m^{-2} und 255 W m^{-2} im Juli, 225 W m^{-2} , 250 W m^{-2} , 235 W m^{-2} und 255 W m^{-2} im August, sowie 155 W m^{-2} vom 1. September bis Simulationseende. Insbesondere ab 2. September (DOY 245) sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Simulationen sehr gering. Der Grund hierfür ist, dass sich mit zunehmender Simulationszeit der Transpirationsanteil an der Evapotranspiration, bzw. dem latenten Wärmefluss, verringert, während sich der Anteil der Evaporation, die in allen Simulationen auf die gleiche Art berechnet wird, vergrößert. Nachts wird nur selten latenter Wärmefluss simuliert; wenn doch, werden 10 W m^{-2} kaum überschritten.

Ähnlich wie beim Saftfluss (Abschnitt 5.2.3) gibt es auch in den Messungen und Simulationen des latenten Wärmeflusses mittägliche Einbrüche, z. B. am 19. - 20. und 28. Juli sowie am 6. September (DOY 200 - 201, 209 und 249). Bricht der gemessene, latente Wärmefluss zur Mittagszeit ein, ist dies auch in den Simulationen zu erkennen.

Grundsätzlich unterschätzen alle Simulationen die Tagesmaxima der Messwerte, ausgenommen im Zeitraum von 17. - 22. September (DOY 260 - 265). Gleichzeitig wird der simulierte Saftfluss von Mitte Juli bis Mitte August an den meisten Tagen durch das Modell überschätzt (Ausnahme: Pflanze 4). Ein Grund für diese Überschätzung des latenten Wärmeflusses könnte eine zu gering simulierte Evaporation zur Mittagszeit im Juli und August sein. Die Maisreihen auf dem Schlag A17 waren in Nord-Süd-Richtung angepflanzt, sodass insbesondere mittags der Boden teilweise unbeschattet war und ihn somit Solarstrahlung erreichen konnte. Diverse Studien zeigen, dass in der ganzen Wachstumsperiode Wasser aus den Böden von Maisfeldern evaporiert. So maßen Ding u. a. (2013) minimale, tägliche Evaporationsraten von $0,2 \text{ mm d}^{-1}$ - $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ aus einem Maisfeld in China, während ihre Modellrechnung die Evaporation unterschätzte. Selbst in den Monaten Juli, August und September war in einer Studie von Liu u. a. (2002) der monatliche Anteil der Evaporation an der Evapotranspiration aus einem Maisfeld etwa ein Viertel. Auch Herbst u. a. (1996) maßen in Schleswig-Holstein bei einem LAI von $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ am 20. Juli Evaporationsraten von $0,2 \text{ mm h}^{-1}$ bzw. $1,5 \text{ mm d}^{-1}$ aus einem Maisfeld, während bei einem LAI von $2,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ am 18. August kaum Evaporation gemessen wurde. Um in diesen Modellrechnungen von Anfang an etwas Evaporation zu simulieren wurden, deshalb die eingegebenen, gemessenen Blattflächenindizes nicht verdoppelt (um beide Blattseiten zu berücksichtigen), sondern der einfache Wert verwendet. Insbesondere zu Simulationsbeginn änderte sich durch die Halbierung des

Blattflächenindexes die simulierte, aktuelle Transpiration nur wenig, da trotzdem ein Großteil der potentiellen Evapotranspiration als Transpiration partitioniert wurde und da die aktuelle Transpiration durch das Xylemflussmodell limitiert wurde, egal wie hoch der Wert der potentiellen Transpiration war. Die IA-Werte der einzelnen Simulationen betragen 0,90 (Pflanze 1) und 0,91 (Pflanze 2 - 4), die NSE-Werte liegen zwischen 0,67 (Pflanze 1) und 0,70 (Pflanze 2 und 4).

Die Simulationswerte sowohl des latenten Wärmeflusses als auch des Saftflusses stimmen prinzipiell mit den dazugehörigen Messwerten überein. Gleichzeitig ist in den Simulationen der latente Wärmefluss direkt proportional zur aktuellen Evapotranspiration (Gleichung 4.10), die wiederum durch die Summe aus aktueller Evaporation und Transpiration (Xylemflussmodell) bestimmt ist. Somit können, aufgrund der Referenzmessung der Evapotranspiration mit der Eddy-Kovarianz-Methode, die unter Feldbedingungen durchgeführten Saftflussmessungen mit der Heat-Ratio-Methode als gültig angesehen werden.

Die von Klein u. a. (2017a) simulierte latenten Wärmeflüsse aus dem Feld A18 der Forschungsplattform Scheyern aus dem Jahr 2012 waren etwas höher (bis zu 450 W m^{-2}) als die hier simulierte, latenten Wärmeflüsse. Dies hängt unter anderem mit der Anwendung eines anderen Transpirationsmodells (SPASS) zusammen, aber auch damit, dass im Jahr 2012 prinzipiell weniger Wasserstress, also weniger Reduktion von potentieller zu aktueller Transpiration, simuliert wurde. Die Messungen des latenten Wärmeflusses aus den Vorjahren lagen in einem ähnlichen Bereich wie in 2015. Allerdings repräsentierten diese den latenten Wärmefluss aus einem Weizen- bzw. Kartoffelfeld. Auch Li u. a. (2010) simulierte latente Wärmeflüsse aus Maisfeldern in China in den Jahren 2003 und 2004. Die Tagesmaxima ihrer Messwerte lagen zwischen 140 W m^{-2} und 340 W m^{-2} , die ihrer Simulationswerte zwischen 190 W m^{-2} und 340 W m^{-2} .

5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen: Scaling

Im Rahmen von AgMIP (The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) und MACSUR (Modelling European Agriculture with Climate Change for Food Security) entstanden mehrere Publikationen (Hoffmann u. a. 2016; Van Bussel u. a. 2016; Zhao u. a. 2016), die in Abschnitt 1.5 kurz vorgestellt wurden. Hierzu haben Christian Biernath, Christian Klein, Eckart Priesack und ich mit der Durchführung einer Vielzahl von Simulationen des Winterweizenwachstums mit Expert-N beigetragen. Deshalb sollen in dieser Dissertation die Ergebnisse der Expert-N-Simulationen am Beispiel von Evapotranspiration und Perkolation detailliert vorgestellt werden.

5.3.1 Zeitreihen

Abbildung 5.12 zeigt zwei Zeitreihen der jährlichen über alle Gitterpunkte gemittelten aktuellen Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode], wobei das angegebene Jahr das Erntejahr darstellt. Die durchschnittliche Evapotranspiration der hochaufgelösten Simulation schwankt zwischen 470 mm (1983) und 580 mm (2007). Diese Jahre sind durch entsprechend wenig (1982 und 1983) bzw. viel (2007) Niederschlag charakterisiert (vgl. Abbildung 4.10b). In den Jahren 1985 und 2002 ist die simulierte Evapotranspiration ebenfalls hoch. Diese Jahre bzw. das Vorjahr 1984 weisen auch vergleichsweise hohe Niederschlagssummen auf. Die Jahre 1991, 1996, 2003 und 2011 hingegen sind von einer eher niedrigen aktuellen Evapotranspiration und von geringen Niederschlagssummen bestimmt. Ein direkter Zusammenhang mit den anderen Wetterdaten ist hier wiederum nicht zu erkennen. So nimmt zumindest das über die Fläche gemittelte Wetter (mit Ausnahme des Niederschlags) in 1985 und 1996 sehr ähnliche Werte an, obwohl die simulierte Evapotranspiration in diesen Jahren sehr unterschiedlich ist. Aufgrund der nichtlinearen Prozessbeschreibungen, z. B. des Pflanzenwachstums (vgl. Wang und Engel 2000), das die simulierte aktuelle Transpiration und somit die aktuelle Evapotranspiration mitbestimmt, sind nicht nur die jährlich gemittelten Wetterdaten sondern auch die täglichen Eingabewerte sehr entscheidend für das Simulationsergebnis.

Bei den Expert-N Simulationen, die von Zhao u. a. (2016) analysiert wurden, sind die flächig gemittelten, simulierten Weizenerträge am stärksten mit der Temperatur und dem Wasserhaltevermögen bis in 1,5 m Tiefe korreliert, während eine negative Korrelation zwischen Niederschlag und Erträgen gefunden wurde. Diese Zusammenhänge sind

jedoch bei Betrachtung der Evapotranspiration nicht zu erkennen. Laut einer Theorie von Zhang u. a. (2004) kann die jährliche, aktuelle Evapotranspiration in einem bestimmten Einzugsgebiet aus den Summen des jährlichen Niederschlags und der potentiellen Evapotranspiration ermittelt werden, wobei der Niederschlag der wichtigste Faktor für die Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration ist.

Die Evapotranspiration des durchschnittlichen Gitterpunktes unterscheidet sich deutlich von jener der hochaufgelösten Simulation. So liegt diese zwischen 385 mm (1988) und 460 mm (1989 und 2006). Das Jahr 1988 ist von vergleichsweise viel Niederschlag, hoher relativer Luftfeuchte und geringer Solarstrahlung geprägt. Das Wetter im Jahr 1989 ist dazu gegensätzlich. Die Verfügbarkeit des entsprechenden Niederschlagswassers aus dem Jahr 1988 in 1989 im Boden könnte jedoch das Maximum der aktuellen Evapotranspiration in diesem Jahr erklären. So beträgt zwischen 0 cm und 150 cm Tiefe der verfügbare Wassergehalt im durchschnittlichen Boden 300 mm und im kompletten Profil 429 mm, was im Vergleich mit allen verfügbaren Gitterpunkten (Abbildung 4.11c) im oberen Drittel anzusiedeln ist. Im Allgemeinen ähnelt der Kurvenverlauf der durchschnittlich simulierten Evapotranspiration eher dem der Referenz-Evapotranspiration (Abbildung 4.10f).

Die Ergebnisse der Simulationen, die mit verschiedenen räumlichen Auflösungen des Bodens und einem durchschnittlichen Wetter gerechnet wurden, sowie der Simulationen, die verschiedene Auflösungen von Wetter und Boden beinhalten, sind in Abbildung 5.13 dargestellt. In beiden Abbildungen weisen die Simulationen von nur einem Gitterpunkt (im Folgenden auch NRW-Simulation genannt) in allen Jahren deutlich höhere jährliche Evapotranspirationssummen als die anderen Modellläufe auf. Auch sind bei diesen Zeitreihen manche Extrema im Vergleich zu den höher aufgelösten Simulationen verschoben. So tritt bei der Einzelsimulation die maximale jährliche Evapotranspiration in 1989 bzw. 2006 auf, während in den anderen Simulationen die jährlichen Evapotranspirationssummen in 1990 bzw. 2005 vergleichsweise hoch sind. Ebenso wurde bei den höher aufgelösten Simulationen im Jahr 2003 ein lokales Minimum simuliert, bei der Durchschnittssimulation schon ein Jahr früher. Der Sommer 2003 war in Europa von einer extremen Dürreperiode bestimmt, die durch hohe Temperaturen, niedrige relative Luftfeuchte und wenig Niederschlag gekennzeichnet war (Rebetez u. a. 2006). Der durchschnittliche Boden, der in dieser Studie verwendet wurde, ist jedoch durch einen hohen verfügbaren Wassergehalt gekennzeichnet. Insbesondere, da in der durchschnittlichen Simulation im Jahr 2002 wenig Evapotranspiration simuliert wurde, war ein Teil des Niederschlags aus dem Jahr 2002 möglicherweise noch in 2003 im simulierten Boden

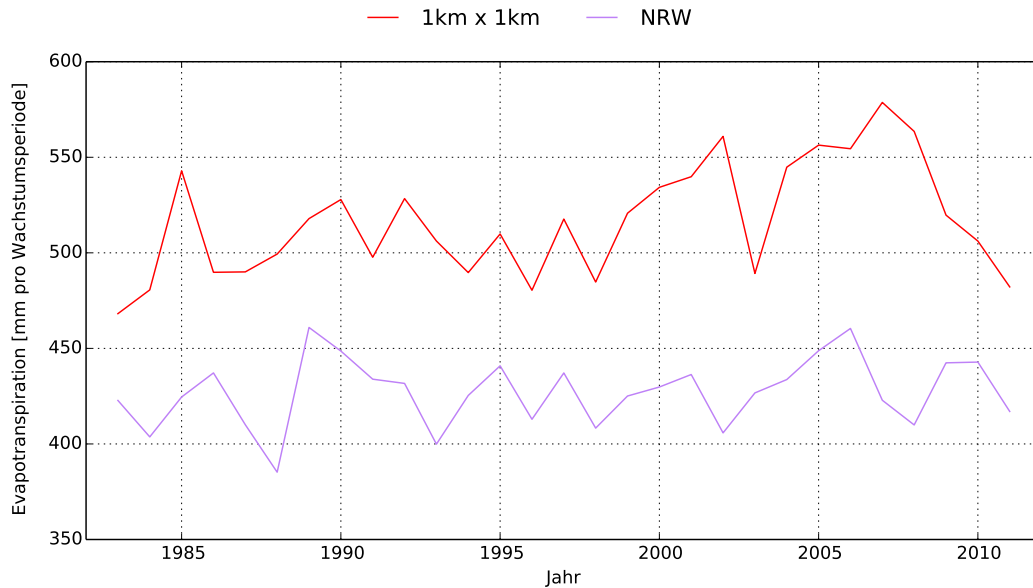


Abbildung 5.12: Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten, Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode] von 1983 bis 2011. Die Farben stellen die verschiedenen Auflösungen der Wetterdaten dar, wobei die Simulationen mit 34078 Gitterpunkten (rote, durchgezogene Linie) und mit einem einzigen, durchschnittlichen Gitterpunkt (violette, durchgezogene Linie) durchgeführt wurden.

vorhanden. Dadurch war das Pflanzenwachstum und die Transpiration nur wenig oder gar nicht eingeschränkt. In der Simulation mit $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung gibt es zwar auch viele Bodenprofile, die ein hohes Wasserspeichervermögen besitzen, allerdings ebenso viele, deren verfügbarer Wassergehalt sehr niedrig ist. An letzteren Gitterpunkten muss das simulierte Pflanzenwachstum aufgrund der Austrocknung im Jahr 2003 stark eingeschränkt gewesen sein, und somit auch die Transpiration. Diese extremen Minima der Transpiration bzw. Evapotranspiration einiger Gitterpunkte können sich auf die räumlich gemittelte Evapotranspiration ausgewirkt haben.

Die vier Simulationen der Evapotranspiration mit Eingabe von variablem Boden und einem Durchschnittswetter (Abbildung 5.13a) zeigen einen sehr ähnlichen zeitlichen Verlauf, wenn die Bodendaten zwischen $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ und $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ aufgelöst sind. Der Maximalwert wird bei all diesen Simulationen im Jahr 1997 (ca. 425 mm) erreicht, der Minimalwert in 2011 (zwischen 336 mm und 344 mm). Der maximale Unterschied zwischen diesen Simulationen beträgt 8 mm. Der Modellauf mit $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auf-

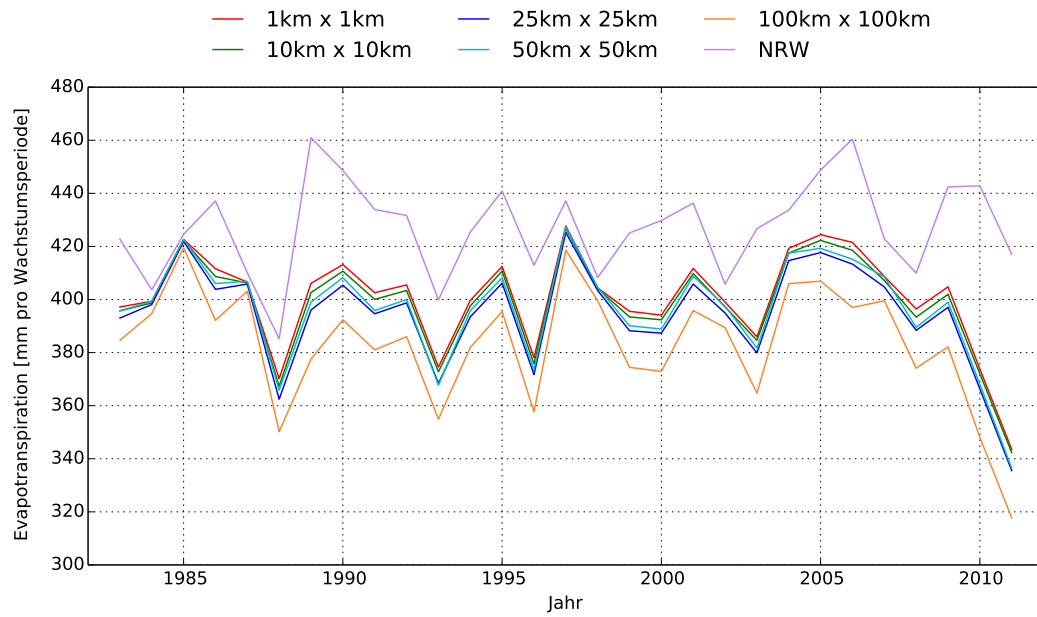
lösung hebt sich geringfügig ab: hier liegt die maximale Evapotranspiration bei 420 mm (1985 und 1987), die Minimale bei 318 mm (2011).

Werden nun zusätzlich die Wetterdaten auch variabel aufgelöst (Abbildung 5.13b), zeigt sich ein ähnliches Bild: mit Ausnahme der NRW-Simulation wurde die maximale Evapotranspiration im Jahr 1997 (zwischen 417 mm und 420 mm) simuliert, während das Jahr 2011 die geringsten jährlichen Evapotranspirationssummen (zwischen 310 mm und 340 mm) aufweist. Auch hier hebt sich der Modelllauf mit $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ Auflösung wieder von den höher aufgelösten etwas ab. Die jährlichen Evapotranspirationssummen der Simulationen mit Auflösungen zwischen $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ und $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ liegen zwar immer noch sehr eng beieinander, jedoch unterscheiden sich die einzelnen Kurvenverläufe ab 1999 geringfügig.

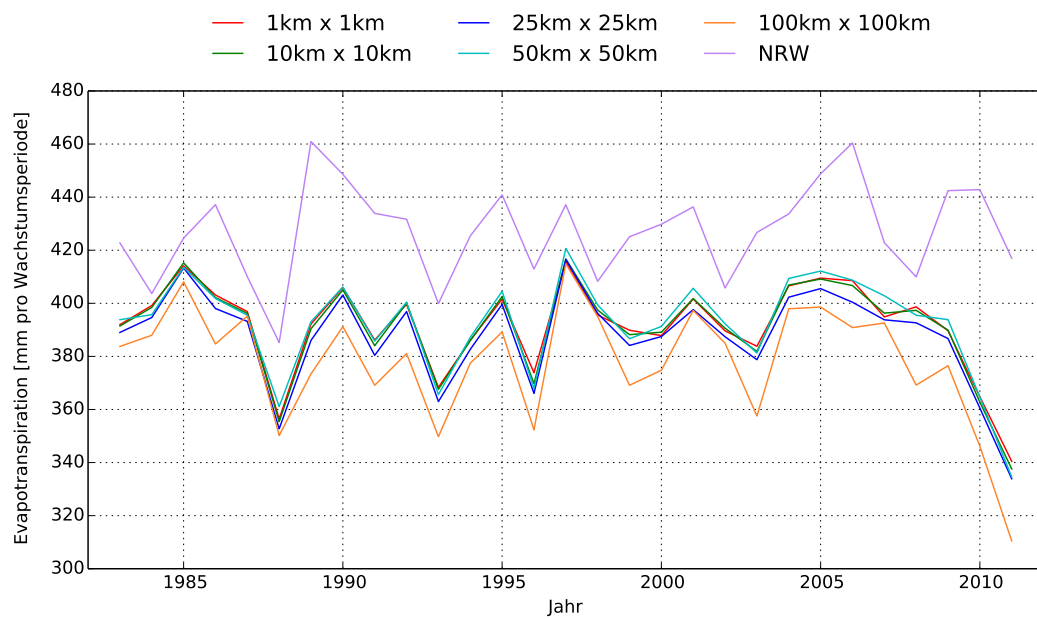
Die über die Fläche gemittelte Perkolation der sechs Modellläufe mit variablen Bodendaten und durchschnittlichen Wetterdaten ist in Abbildung 5.14a dargestellt. Bei der NRW-Simulation beträgt sie minimal 100 mm a^{-1} (1983) und maximal ungefähr 500 mm a^{-1} (1998 und 2007). Dies steht in Einklang mit dem jährlichen Niederschlag (Abbildung 4.10b): dieser war in 1983 vergleichsweise gering, und in 1998 und 2007 maximal. Die Maxima der Perkolation (ca. 530 mm a^{-1}) treten auch bei allen höher aufgelösten Simulationen in diesen Jahren auf. Die geringste Perkolation (etwa 200 mm a^{-1}) wurde bei diesen Modellläufen in 1997 simuliert, das Jahr in dem die simulierte Evapotranspiration maximal war. Da der Niederschlag in diesem Jahr vergleichsweise gering war, wurde das Wasser im Modell also hauptsächlich von den Pflanzen aufgenommen bevor es versickern konnte. Bis auf die NRW-Simulation, die meistens weniger Perkolation simuliert, weisen die durchschnittlichen, jährlichen Perkolationssummen aller anderen Modellläufe sehr geringe Unterschiede von maximal 15 mm a^{-1} auf.

Bei zusätzlicher Variation der Wetterdaten (Abbildung 5.14b) werden minimale und maximale Perkolation in denselben Jahren simuliert wie in den Simulationen mit durchschnittlichem Wetter. Die jährliche Perkolation ist in diesem Fall jedoch grundsätzlich zwischen 10 mm a^{-1} und 50 mm a^{-1} höher als bei den Simulationen, für die nur die Bodendaten variiert wurden. Auch hier liegt die Kurve der NRW-Simulation in den meisten Jahren deutlich unterhalb der anderen Kurven. Auffällig ist ebenfalls, dass in fast allen Jahren die über die Fläche gemittelte Perkolation mit Zunahme der Auflösung zunimmt.

Interessiert sich der Anwender also für die über die Fläche gemittelte, jährliche Evapotranspiration oder Perkolation, mag es sinnvoll sein, mit einer geringeren Auflösung (in diesem Fall $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ für die Evapotranspiration bzw. $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ für die



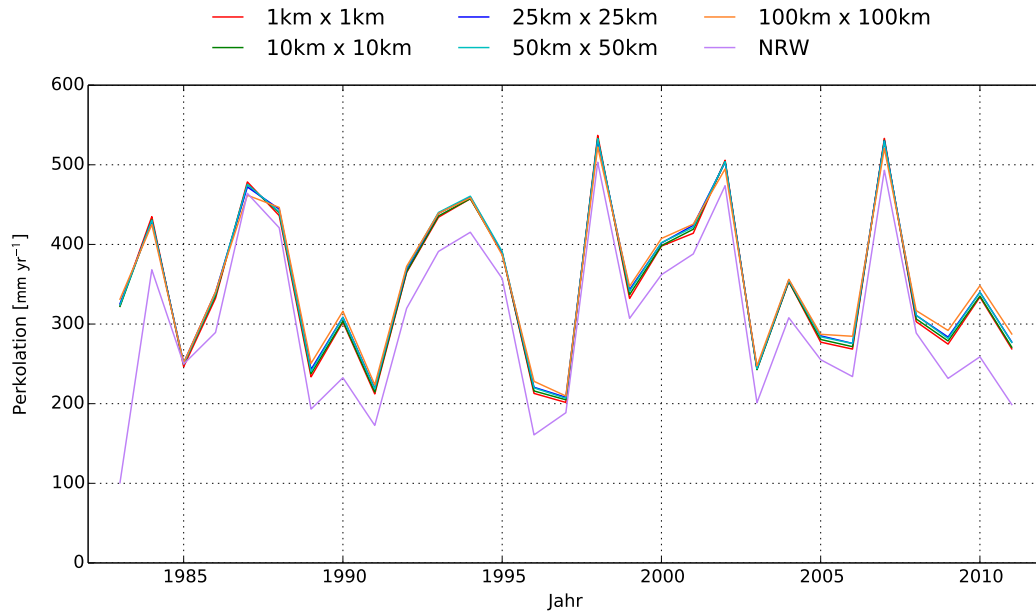
(a) Simulationen mit variablem Boden und einem Durchschnittswetter



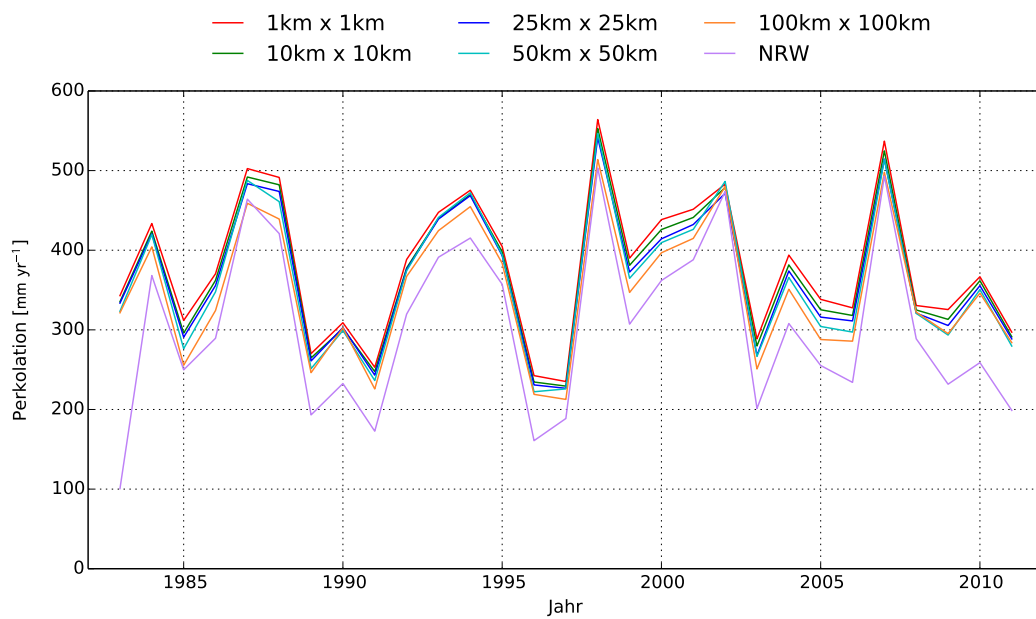
(b) Simulationen mit variablem Wetter und Boden

Abbildung 5.13: Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode]. Die unterschiedlichen Farben stellen die verschiedenen Auflösungen von Boden- und/oder Wetterdaten dar. Diese reichen von $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ bis zu einer einzigen Simulation für das ganze Bundesland (NRW), bei der ein durchschnittliches Wetter und ein durchschnittlicher Boden als Eingabe dient.

5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen



(a) Simulationen mit variablem Boden und einem Durchschnittswetter



(b) Simulationen mit variablem Wetter und Boden

Abbildung 5.14: Zeitreihen der jährlichen über die gesamte Fläche gemittelten Perkolation [mm a^{-1}]. Die unterschiedlichen Farben stellen die verschiedenen Auflösungen von Boden- und/oder Wetterdaten dar. Diese reichen von $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ bis zu einer einzigen Simulation für das ganze Bundesland (NRW), bei der ein durchschnittliches Wetter und ein durchschnittlicher Boden als Eingabe dient.

Perkolation) zu simulieren anstatt sehr hoch aufgelöste Eingabedaten zu verwenden. So liegt der Unterschied zwischen den simulierten Evapotranspirations- und Perkolationssummen in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ und in $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ bzw. in $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auflösung bei maximal 2% bzw. 10%, in den meisten Jahren sogar deutlich darunter. Eine solche Reduzierung der Auflösung würde sehr viel Rechenzeit sparen und außerdem die Simulation auf einem Einzelrechner ermöglichen, was oftmals mit weniger Aufwand verbunden ist als die Benutzung eines Hochleistungsrechners. Eine Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass ausreichend repräsentative Gitterpunkte ausgewählt werden, um ein möglichst breites Spektrum an Einzelergebnissen zu erhalten.

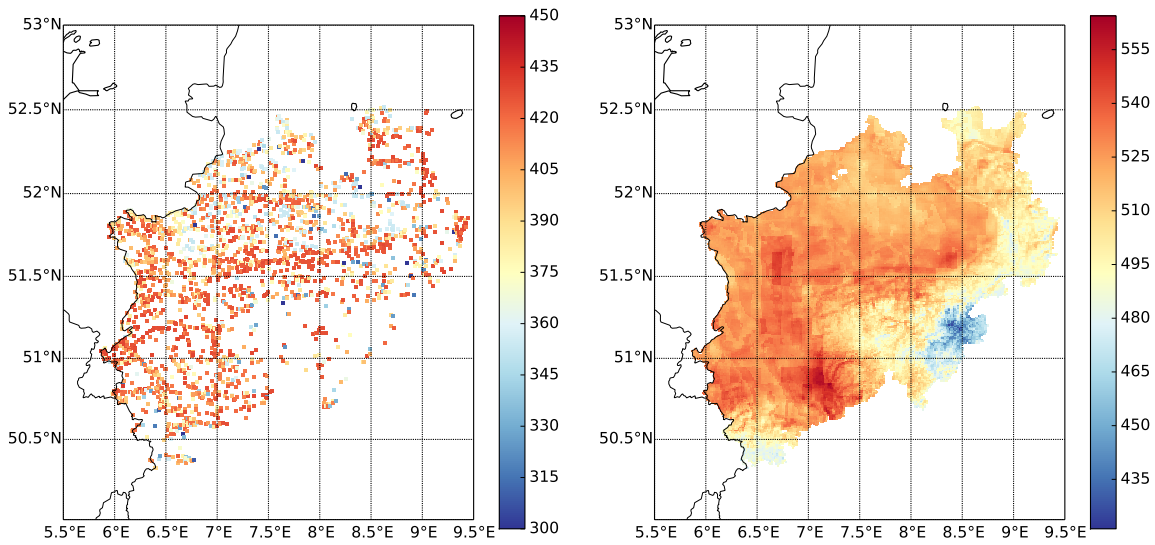
Van Bussel u. a. (2016) fanden bei ihrem Modellvergleich heraus, dass bei einer Vielzahl von Modellen schon die simulierten Erträge von 10 Gitterpunkten ausreichen, um den über alle 34078 Gitterpunkte gemittelten Ertrag zu berechnen. Grundsätzlich sind für die Bestimmung der Gitterpunkte die Auswahl durch geschichtete Zufallsstichproben einer komplett zufälligen Auswahl vorzuziehen.

Eine Verringerung der Auflösung unter $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ führte bei den Simulationen der Evapotranspiration und der Perkolation mit Expert-N zu deutlich stärkeren Abweichungen von den jährlichen Durchschnittswerten der Simulationen mit $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung und sollte dementsprechend gut überdacht werden. Eine allgemein gültige Gitterpunktgröße (oder Stichprobenzahl), die bei Überschreitung (Unterschreitung) zu stark veränderten durchschnittlichen Simulationsergebnissen führt, kann dennoch nicht abgeleitet werden, da sich Wetter- und Bodendaten in jeder Region mehr oder weniger stark unterscheiden können. Stattdessen müssten zunächst hochaufgelöste Simulationen durchgeführt werden, aus denen dann z. B. die kritische Gitterpunktgröße abgeleitet werden kann.

5.3.2 Flächige Darstellung

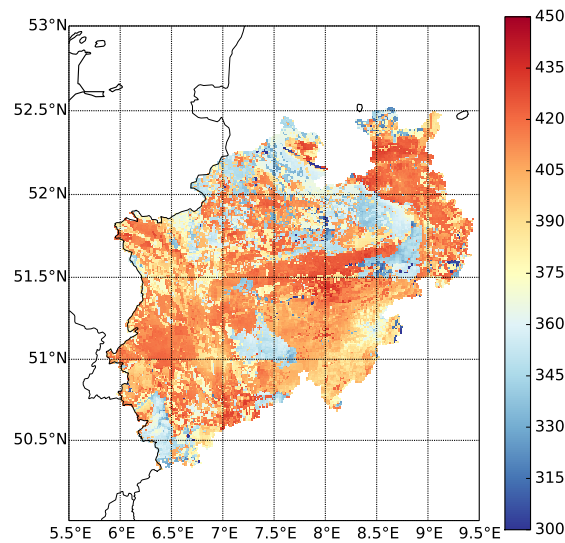
Abbildung 5.15 zeigt die dreißigjährigen Mittelwerte der simulierten Evapotranspiration in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung. Bei der Simulation mit variablen Bodendaten und einheitlichem Wetter (Abbildung 5.15a) wurden nur 2640 Gitterpunkte simuliert, da mehrfach vorkommende Böden, die sich nicht unterscheiden, nur einmal simuliert wurden. Die zeitlich gemittelte Evapotranspiration pro Wachstumsperiode liegt in diesem Fall je nach Gitterpunkt zwischen 68,8 mm und 432,2 mm. Aufgrund der vergleichsweise einheitlichen Bodentypen in den Mittelgebirgen im Südosten von Nordrhein-Westfalen (Abbildung 4.11a) wurden nur wenige Gitterpunkte aus dieser Region für die Simula-

5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen



(a) s1 x cNRW

(b) sDS x c1



(c) s1 x c1

Abbildung 5.15: Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode] von Nordrhein-Westfalen in 1 km × 1 km Auflösung:
 (a) Variation der Bodendaten, (b) Variation der Wetterdaten, und
 (c) Variation von Boden- und Wetterdaten. Die Zahlen nach „s“ und „c“
 stellen die Auflösung [km²] von Boden und Wetter dar, „DS“ bezeichnet
 den durchschnittlichen Boden und „NRW“ das mittlere Wetter.

tion ausgewählt. Entlang des Rheins wurde die höchste Evapotranspiration simuliert, während niedrige Evapotranspirationssummen vor allem im Norden auftraten.

Die zeitlich gemittelte Evapotranspiration bei einheitlichen Bodendaten und variablen Wetterdaten (Abbildung 5.15b) liegt je nach Gitterpunkt zwischen 412,2 mm und 564,4 mm. Dieser Wertebereich ist somit deutlich enger als im Falle der variierten Böden in Verbindung mit einheitlichem Wetter. Allgemein ist die Evapotranspiration hier auch deutlich höher. Deshalb wurde in dieser Darstellung auch eine andere Skala als bei den anderen Darstellungen gewählt. Die im Vergleich höheren Evapotranspirationssummen sind darauf zurückzuführen, dass der durchschnittliche Boden, mit dem simuliert wurde, grundsätzlich ein starkes Pflanzenwachstum, und somit hohe Transpirationsraten, ermöglicht. So ist der verfügbare Wassergehalt hoch (vgl. Gleichung 4.26) und reicht bis in 230 cm Tiefe.

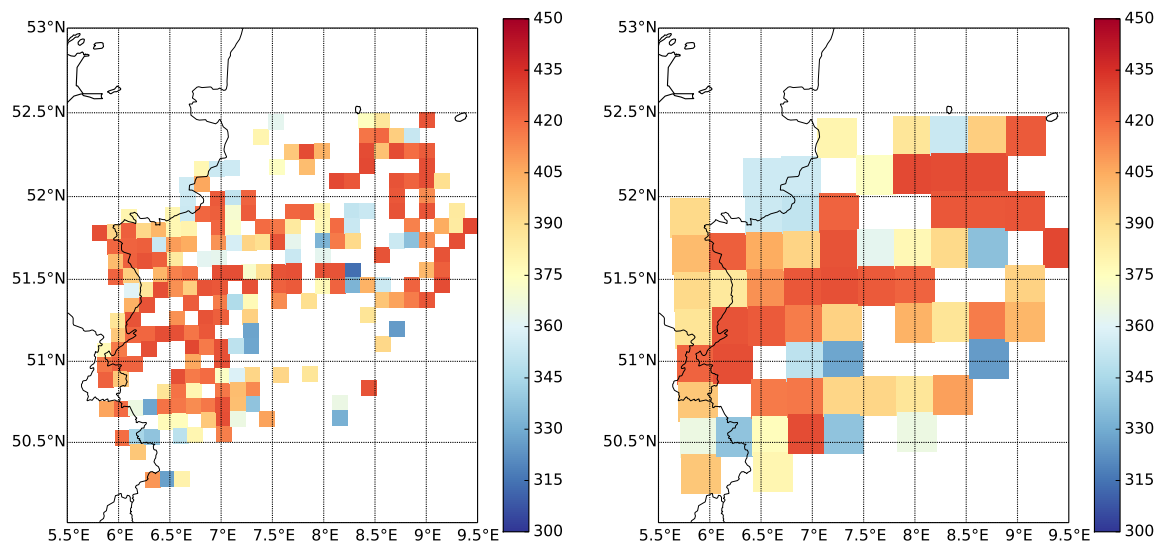
In der Verteilung über die Fläche ist die Struktur der Wetterdaten deutlich wiederzuerkennen: vor allem entlang des Rheins ist die gröber aufgelöste Datenstruktur der Strahlung gut zu erkennen (Abbildung 4.9c). Die Evapotranspiration ist an den Gitterpunkten am höchsten, an denen auch die Strahlung am höchsten und die relative Luftfeuchte (Abbildung 4.9b) am niedrigsten ist. Besonders in den Regionen mit hoher durchschnittlicher relativer Luftfeuchte ist die simulierte Evapotranspiration niedrig, z. B. im östlichen Sauerland und in der Eifel. Ebenso deutlich in der geographischen Verteilung sind die Lage des Teutoburger Waldes und des Wiehengebirges zu erkennen. Diese weisen eine etwas niedrigere Evapotranspiration als das Umland auf. Die Lage der Flusstäler im Sauerland und Rothaargebirge mit höherer Evapotranspiration als im umliegenden Mittelgebirge wird ebenfalls deutlich. Darin spiegelt sich die räumliche Verteilung der Temperaturen (Abbildung 4.8) wider, die ebenfalls in den Mittelgebirgsregionen niedrig und in den tiefer liegenden Tälern hoch sind.

Werden nun Wetter und Böden auf $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ aufgelöst (Abbildung 5.15c) ist die Bandbreite der über 30 Jahre gemittelten, jährlichen Evapotranspirationssummen am größten. Diese reicht von 29,2 mm bis 440,3 mm. Die geographische Verteilung der Wetterdaten ist nun kaum noch zu erkennen. Einzig und allein die hohe Evapotranspiration entlang des Rheins lässt sich mit den dortigen Temperaturen (Abbildung 4.8), die vergleichsweise hoch sind, in Verbindung bringen. Jedoch ähneln sich die räumliche Verteilung von Evapotranspiration und verfügbarem Bodenwasser (berechnet aus Gleichung 4.26, dargestellt in Abbildung 4.11c): die simulierte Evapotranspiration ist an den Gitterpunkten hoch, an denen viel Bodenwasser zur Verfügung steht, z. B. nordwestlich von Köln oder direkt nördlich des Sauerlandes. Umgekehrt ist in der Eifel, nordöstlich von

Köln und im Eggegebirge wenig Bodenwasser verfügbar und gleichzeitig die Evapotranspiration im Mittel niedrig. Dies sind wiederum Regionen, in denen das Bodenprofil (Abbildung 4.11b) nur bis in 50 cm Tiefe reicht. Deshalb ist ebenfalls das Pflanzenwachstum eingeschränkt, was sich u. a. durch geringe Simulationswerte der Kornerträge und des maximalen Blattflächenindex (jeweils ohne Abbildung) manifestiert.

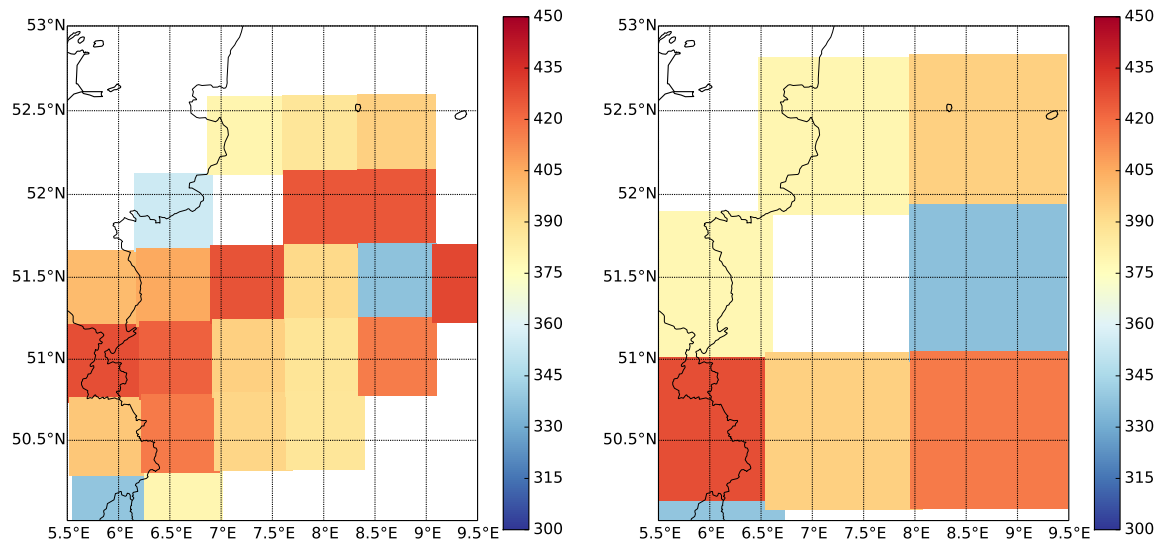
Die dreißigjährigen Mittelwerte der Evapotranspiration, die unter Verwendung von flächig-einheitlichen Wetterdaten und unterschiedlich aufgelösten Bodendaten simuliert wurden, sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Bei den Simulationen mit $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ (Abbildung 5.16a, 223 Gitterpunkte) und $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ (Abbildung 5.16b, 65 Gitterpunkte) Auflösung der Bodendaten ist wie in der am höchsten aufgelösten Simulation (Abbildung 5.15a) die geographische Verteilung der Evapotranspiration noch gut zu erkennen. Diese Verteilung geht dann bei einer noch weiteren Vergrößerung des Gitters auf $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ (Abbildung 5.16c, 23 Gitterpunkte) und $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ (Abbildung 5.16d, 8 Gitterpunkte) verloren. Dennoch nehmen die Ergebnisse der Simulationen mit vergrößerter Auflösung auf den einzelnen Gitterpunkten einen Wert an, der bei Betrachtung des nächstfeineren Gitters auf einem „in der Nähe liegenden“ Gitterpunkt ebenfalls vorkommt. So beträgt z. B. die Evapotranspiration des jeweils nordöstlichsten Gitterpunktes bei $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ und $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auflösung ungefähr 400 mm. Im Vergleich zur Simulation mit $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ bleibt bei allen Auflösungen das Maximum der Evapotranspiration nahezu erhalten: dieses nimmt von der feinsten zur größten Auflösung von 432,2 mm nur um weniger als 5 mm auf 427,5 mm ab. Die Minima der simulierten Evapotranspiration erhöhen sich jedoch mit zunehmender Vergrößerung der Auflösung: beträgt es bei $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung noch 68,8 mm, bei $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ Auflösung schon 313,8 mm und in den zwei am größten aufgelösten Simulationen ca. 337 mm.

Bei der gleichförmigen Reduktion der Auflösung von Boden- und Wetterdaten wurde immer das ganze Gebiet von Nordrhein-Westfalen simuliert. Dies ist in der Darstellung der Evapotranspirations-Simulationen mit unterschiedlichem Wetter und Klima (Abbildung 5.17) ersichtlich. In allen vier Abbildungen lässt sich die grundsätzliche geographische Verteilung der Evapotranspiration im Vergleich zu Abbildung 5.15c wiedererkennen, aber mit entsprechendem Verlust der Strukturen bei Vergrößerung der Auflösung. So treten z. B. hohe Evapotranspirationssummen von 420 mm und darüber bei $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ (Abbildung 5.17a, 410 Gitterpunkte) und $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ (Abbildung 5.17b, 80 Gitterpunkte) Auflösung noch in ganz Nordrhein-Westfalen, also im Norden und im Süden, auf, während bei $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ (Abbildung 5.17c, 24 Gitterpunkte) und



(a) s10 x cNRW

(b) s25 x cNRW



(c) s50 x cNRW

(d) s100 x cNRW

Abbildung 5.16: Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode] von Nordrhein-Westfalen mit gleichem Wetter und unterschiedlichen Böden auf jedem Gitterpunkt:

- (a) 10 km × 10 km, (b) 25 km × 25 km, (c) 50 km × 50 km, und
- (d) 100 km × 100 km Auflösung. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stellen die Auflösung [km²] von Boden und Wetter dar, „NRW“ bezeichnet das mittlere Wetter.

5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen

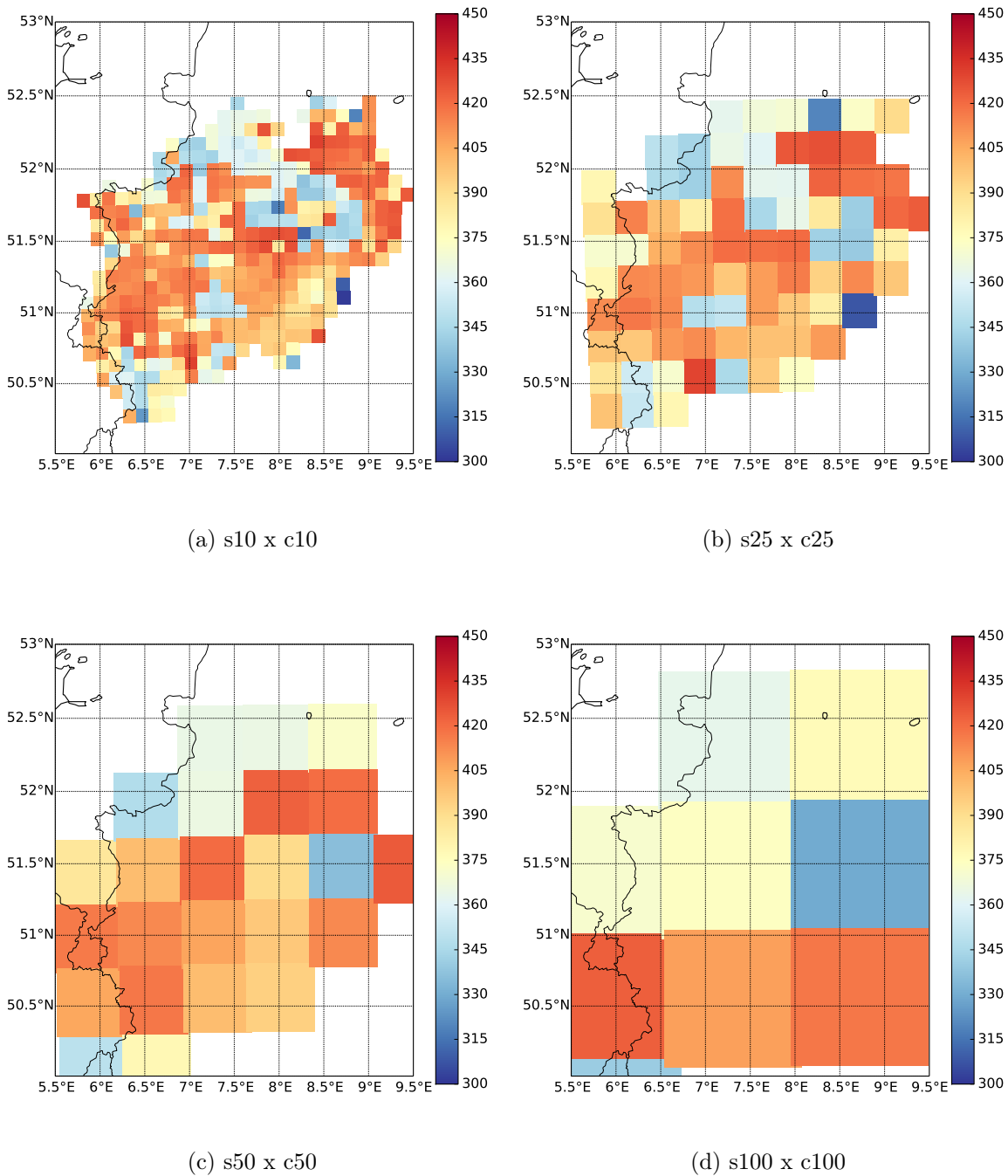


Abbildung 5.17: Dreißigjährige Mittelwerte der Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode] von Nordrhein-Westfalen mit unterschiedlichem Wetter und unterschiedlichen Böden auf jedem Gitterpunkt. Die Auflösungen betragen (a) 10 km × 10 km, (b) 25 km × 25 km, (c) 50 km × 50 km, und (d) 100 km × 100 km. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stellen die Auflösung [km²] von Boden und Wetter dar.

25 km × 25 km (Abbildung 5.17b, 9 Gitterpunkte) Auflösung diese hohen Evapotranspirationssummen vermehrt bzw. ausschließlich im Süden des Bundeslandes vorzufinden sind. Auch in diesem Fall ist zu erkennen, dass die Modellergebnisse einzelner Gitterpunkte sich von feiner zu grober Auflösung fortpflanzen, z. B. liegt die Evapotranspiration des nordöstlichsten Gitterpunktes in den Simulationen mit den zwei größten Auflösungen bei ca. 375 mm. Auch bei 25 km × 25 km Auflösung ist dieser Wert im äußeren Nordosten vorzufinden, jedoch am zweiten Gitterpunkt von Osten her gesehen. Fasst man die drei nordöstlichsten Gitterpunkte der 10 km × 10 km-Simulation zusammen erhält man ebenfalls einen ähnlichen Wert: $380 \text{ mm} = (2 * 410 \text{ mm} + 320 \text{ mm})/3$. Die Minima der einzelnen Evapotranspirations-Simulationen liegen zwischen 301,3 mm und 336,0 mm, die Maxima zwischen 431,0 mm und 423,3 mm. Auch hier verengt sich der Wertebereich durch die Vergrößerung, die Minima betreffend stärker als die Maxima betreffend, insbesondere wenn noch die 1 km × 1 km-Simulation berücksichtigt wird, deren Evapotranspirationssummen sich zwischen 29,2 mm und 440,3 mm erstrecken.

Die dreißigjährigen Mittelwerte der mit 1 km × 1 km Auflösung modellierten, jährlichen Perkolation [mm a^{-1}] sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Bei Verwendung des Durchschnittswetters und hoch aufgelöstem Boden (Abbildung 5.18a) liegt die Perkolation bei 30 Gitterpunkten zwischen $1,7 \text{ mm a}^{-1}$ und 200 mm a^{-1} , während die restlichen 2610 Gitterpunkte höhere Perkolationssummen (maximal $504,0 \text{ mm a}^{-1}$) aufweisen. Die niedrigen Perkolationssummen sind über das ganze Bundesland verteilt, es gibt also augenscheinlich keine bestimmte Region in der die Perkolation besonders niedrig oder hoch ist, wenn mit einheitlichem Wetter gerechnet wird.

Wird mit gitterpunktspezifischen Wetter- und Bodendaten gerechnet (Abbildung 5.18b), reicht die durchschnittliche jährliche Perkolation von 0 mm a^{-1} bis $830,3 \text{ mm a}^{-1}$, ist also deutlich variabler als bei der Simulation mit durchschnittlichem Wetterdaten. In den Mittelgebirgen Eifel, Sauerland, Rothaargebirge und Teutoburger Wald ist die Perkolation am Höchsten, entlang des Rheins, in der Westfälischen Bucht und im äußeren Nordosten treten niedrige Perkolationssummen auf. Diese Verteilung ist der des jährlichen Niederschlags (Abbildung 4.9a) sehr ähnlich, wobei viel Niederschlag (z. B. in den Mittelgebirgen) mit hoher Perkolation und wenig Niederschlag (z. B. entlang des Rheins) mit niedriger Perkolation in Verbindung steht. Auch sind weiterhin einzelne Flusstäler mit vergleichsweise geringer Perkolation im Bereich des Sauerlandes zu erkennen. Zusätzlich gibt es innerhalb der Mittelgebirgsregionen auf etwa 51°N zwei Teilbereiche in denen die simulierte, jährliche Perkolation nur in etwa 200 mm a^{-1} bzw. 350 mm a^{-1} beträgt. Dies sind jeweils Teile von größeren Bereichen, die durch eine Bo-

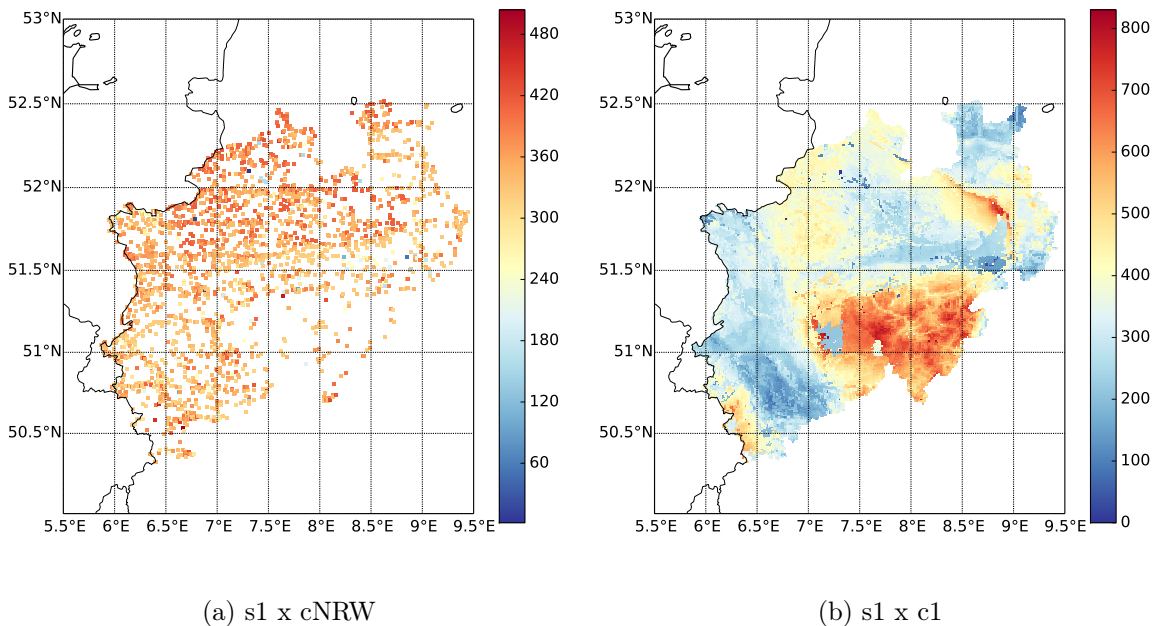


Abbildung 5.18: Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolation [mm a^{-1}] von Nordrhein-Westfalen in $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Auflösung:
 (a) alleinige Variation der Bodendaten, und (b) Variation von Boden- und Wetterdaten. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stellen die Auflösung [km^2] von Boden und Wetter dar, „NRW“ bezeichnet das mittlere Wetter.

dentiefe von 50 cm und weniger als 100 mm verfügbares Wasser (Abbildung 4.11) charakterisiert sind. Innerhalb dieser Bereiche wurde genau dann eine niedrige Perkolation simuliert, wenn das Pflanzenwachstum, z. B. der maximale LAI oder die oberirdische Biomasse, vergleichsweise hoch war. Dies spiegelte sich allerdings nicht in der simulierten Evapotranspiration wider. Im Allgemeinen sind Gitterpunkte mit hohen, durchschnittlichen Evapotranspirationssummen durch eine vergleichsweise niedrige Perkolation gekennzeichnet und umgekehrt. Ausgenommen hiervon ist vor allem das Sauerland und das Rothaargebirge, wo Evapotranspiration und Perkolation gleichzeitig hoch sind. Dies ist vor allem auf die hohen Niederschlagssummen zurückzuführen.

Die Simulationen, welche mit geringer Auflösung der Bodendaten und einem Durchschnittswetter durchgeführt wurden, sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Je geringer die Auflösung ist, desto geringer ist auch der Wertebereich, den die Perkolationssummen der einzelnen Gitterpunkte annehmen. Dieser reicht bei $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ Auflösung der Bodendaten (Abbildung 5.19a) von $169,6 \text{ mm a}^{-1}$ bis $422,9 \text{ mm a}^{-1}$, bei $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$

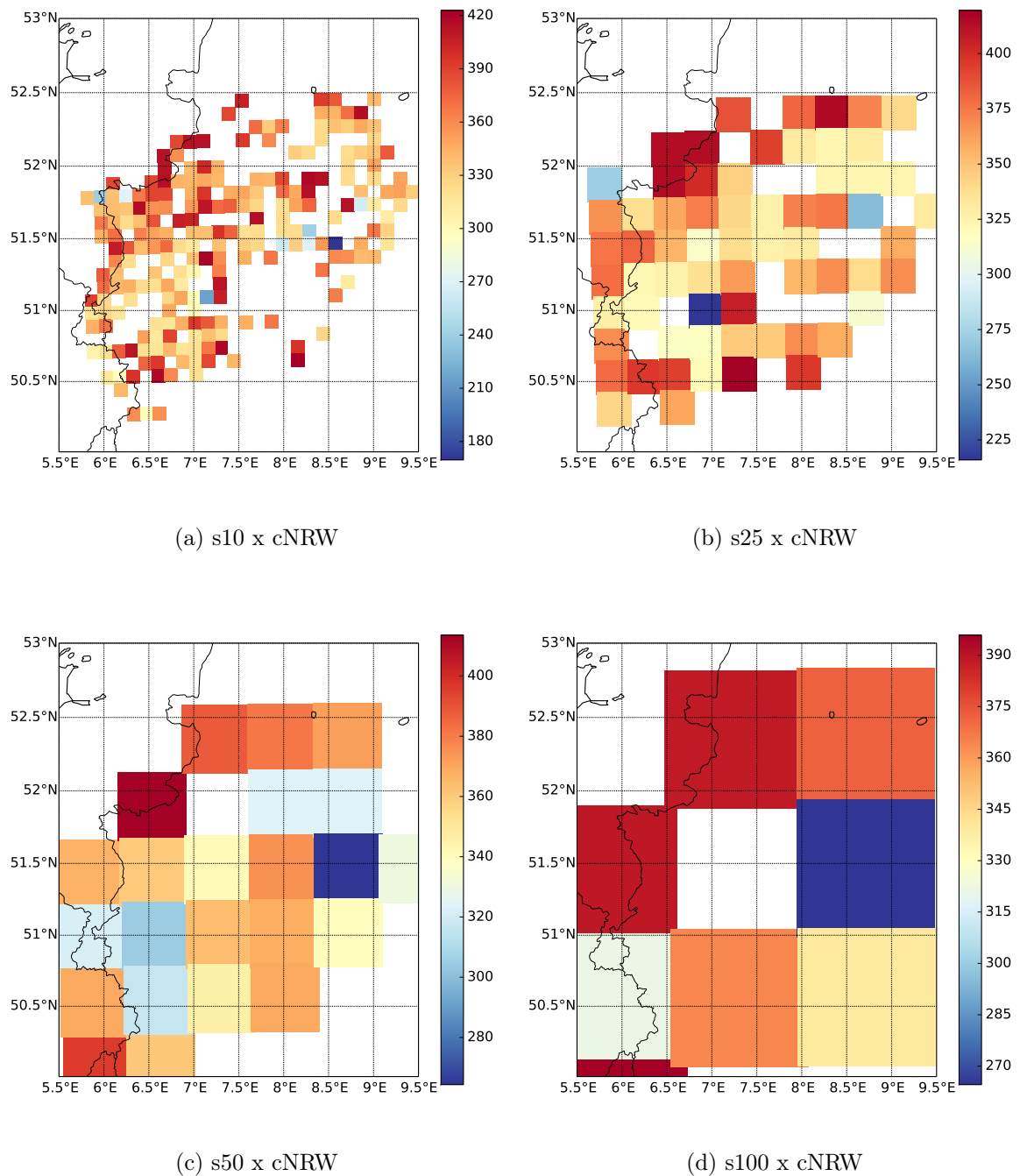


Abbildung 5.19: Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolation [mm a^{-1}] von Nordrhein-Westfalen mit gleichem Wetter und unterschiedlichen Böden auf jedem Gitterpunkt:

(a) $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, (b) $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, (c) $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, und (d) $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ Auflösung. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stehen für die Auflösung [km^2] von Boden und Wetter, „NRW“ bezeichnet das mittlere Wetter.

5.3 Flächige Simulationen mit unterschiedlichen Gittergrößen

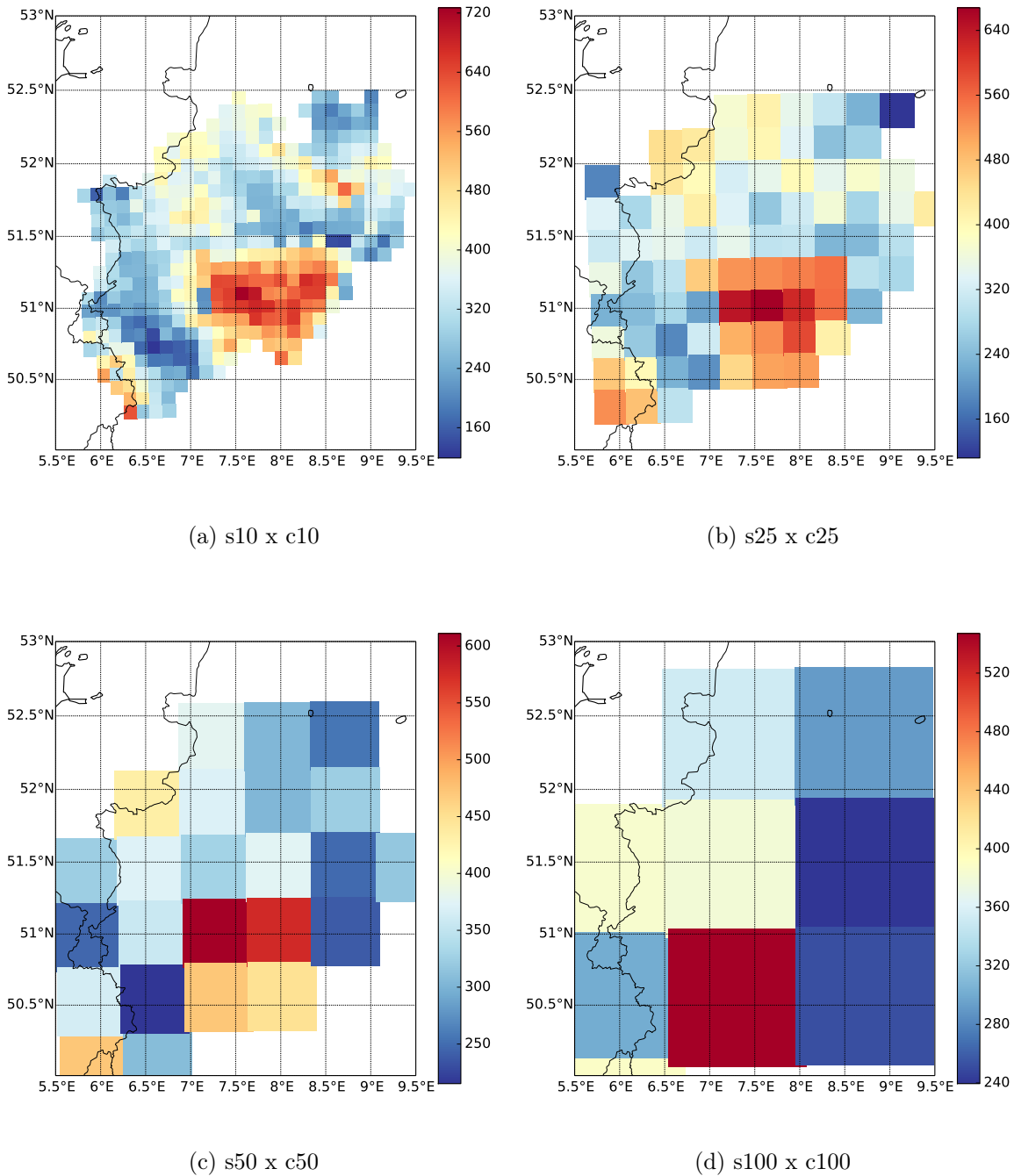


Abbildung 5.20: Dreißigjährige Mittelwerte der Perkolations [mm a^{-1}] von Nordrhein-Westfalen mit unterschiedlichem Wetter und unterschiedlichen Böden auf jedem Gitterpunkt. Die Auflösungen betragen (a) $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, (b) $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, (c) $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, und (d) $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stellen die Auflösung [km^2] von Boden und Wetter dar.

Auflösung (Abbildung 5.19d) nur noch von $264,6 \text{ mm a}^{-1}$ bis $395,9 \text{ mm a}^{-1}$, d. h. es werden - ähnlich wie bei der Evapotranspiration - insbesondere niedrigere Perkolationssummen durch die Verringerung der Auflösung aussortiert, während die maximale Perkolation von der höchsten zur geringsten Auflösung um nur ca. 100 mm a^{-1} abnimmt. Auch in diesen vier Darstellungen ist eine bestimmte geographische Verteilung nicht zu erkennen. Auffällig ist jedoch, dass der Gitterpunkt mit der niedrigsten durchschnittlichen, jährlichen Perkolation in drei dieser vier Simulationen ungefähr bei $51,5^\circ \text{N } 8,5^\circ \text{O}$ liegt. Nur in der Simulation mit $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ Auflösung (Abbildung 5.19b) wird die niedrigste Perkolation weiter südwestlich (bei $51^\circ \text{N } 7^\circ \text{O}$) simuliert.

Bei der gleichzeitigen Verringerung der Auflösung von Wetter- und Bodendaten (Abbildung 5.20) bleibt die geographische Verteilung der Perkolation erhalten. Insbesondere in den Simulationen mit $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ und $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ Auflösung (Abbildungen 5.20a und 5.20b) ist die jährliche Perkolation weiterhin in den großflächigen Mittelgebirgsregionen hoch und entlang des Rheins niedrig. Durch die Reduktion der Auflösung auf $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ wird jedoch unter anderem die erhöhte Perkolation im Teutoburger Wald nicht mehr deutlich. Außerdem führt eine weitere Verringerung der Auflösung dazu, dass besonders hohe und besonders niedrige Perkolationssummen nicht mehr auftreten. So reicht das Spektrum der jährlichen Perkolationssummen bei $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ Auflösung von $119,2 \text{ mm a}^{-1}$ bis $727,0 \text{ mm a}^{-1}$, bei $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ Auflösung (Abbildung 5.20c) von $215,2 \text{ mm a}^{-1}$ bis $611,0 \text{ mm a}^{-1}$, und bei $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ Auflösung (Abbildung 5.20d) von $239,5 \text{ mm a}^{-1}$ bis $547,1 \text{ mm a}^{-1}$.

Aus diesen Abbildungen der geographischen Verteilung von Evapotranspiration und Perkolation wird also deutlich, dass eine Reduktion der Auflösung der Eingabeparameter grundsätzlich mit Informationsverlust verbunden ist: einerseits wird durch die Verringerung der Auflösung nicht mehr das komplette Spektrum aller möglichen Simulationsergebnisse abgedeckt, andererseits geht besonders bei einer stärkeren Reduktion der Auflösung auch die Zuordnung der Simulationsergebnisse zu einer bestimmten geographischen Position verloren.

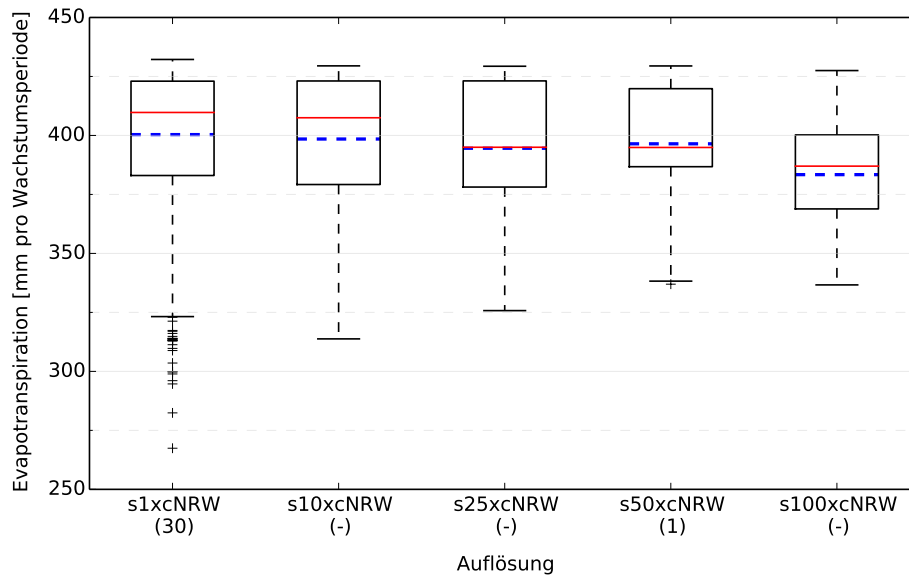
Mithilfe des statistischen Verfahrens WETTREG (WETTERlagen-basierte REGionalisierungsmethode, Kreienkamp u. a. 2013) ermittelte, durchschnittliche Jahressummen (1981 - 2010) der Evapotranspiration und Grundwasserneubildung stellt das nordrhein-westfälische Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz zur Verfügung (LANUV 2017). Die auf diese Art berechnete jährliche Evapotranspiration hängt sehr stark von der vorgegebenen Landnutzung ab. So ist z. B. die Evapotranspiration in den Städten besonders niedrig (maximal 300 mm a^{-1}) und an einzelnen Gitterpunkten entlang

des Rheins sehr hoch (größer als 700 mm a^{-1}). Die mit WETTREG ermittelte Evapotranspiration ist räumlich variabler als die mit Expert-N simulierte, selbst wenn Boden- und Wetterdaten mit $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ aufgelöst wurden (Abbildung 5.15c). Die Grundwasserneubildung der WETTREG-Daten ist in Teilen der mit Expert-N simulierten Perkolation (Abbildung 5.18b) ähnlich. Entlang des Rheins wurde in Expert-N nur wenig Perkolation simuliert, während die WETTREG-Daten ebenfalls an vielen Gitterpunkten auf wenig Grundwasserneubildung oder sogar Grundwasserzehrung hindeuten. Insbesondere an einzelnen Gitterpunkten im Sauerland und im Teutoburger Wald sind die WETTREG-Daten durch mehr als 400 mm a^{-1} Grundwasserneubildung gekennzeichnet. Ebenso ist die von Expert-N simulierte Perkolation in diesen Gebieten hoch. Wie bei der Evapotranspiration ist auch bei der Grundwasserneubildung die räumliche Variabilität der WETTREG-Daten deutlich höher als bei der mit Expert-N simulierten Perkolation.

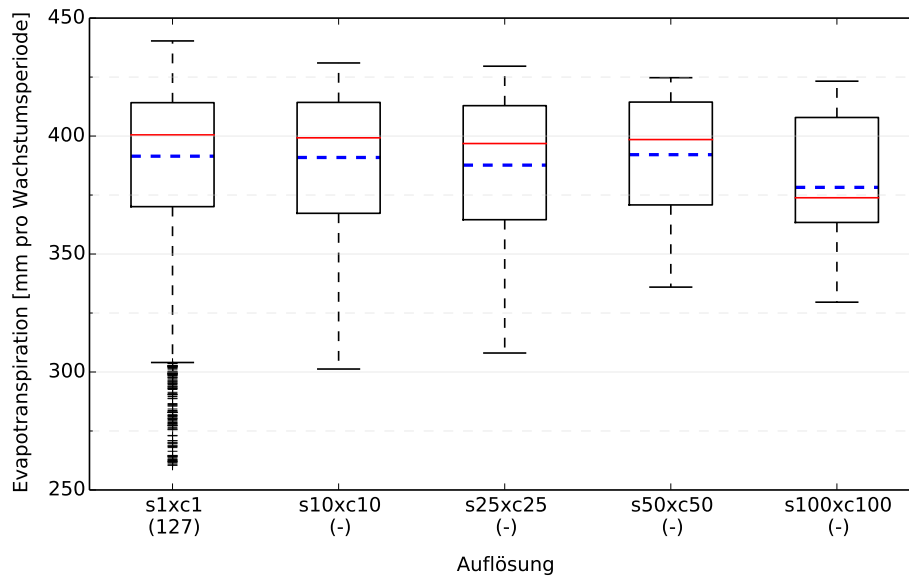
5.3.3 Auswirkungen der verschiedenen räumlichen Auflösungen auf die Simulationsergebnisse

Um die Auswirkungen der Reduktion der Auflösung auf die Simulationsergebnisse zu quantifizieren, wurden zusätzlich Box-Whisker-Plots der dreißigjährigen Mittelwerte der jährlichen Evapotranspiration und Perkolation erstellt. Generell ist zu beachten, dass die Werte außerhalb des Antennenbereiches in diesem Fall nicht als Ausreißer zu verstehen sind. Vielmehr wurde bei der Erstellung der Grafiken die Konvention berücksichtigt, dass die Antennen in beide Richtungen maximal eineinhalb mal so lang wie die Boxen sind.

Für die dreißigjährigen Mittel der Evapotranspiration sind die Box-Whisker-Plots in Abbildung 5.21 dargestellt. Die Kategorisierung der Simulationsergebnisse unter Eingabe von durchschnittlichem Wetter und variablen Böden (Abbildung 5.21a) zeigt ebenfalls (vgl. Abschnitt 5.3.2), dass mit Abnahme der Auflösung das Spektrum der Simulationsergebnisse deutlich geringer wird. So erstreckt dieses sich bei der $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ -Simulation über knapp 400 mm , bei der $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ -Simulation nur noch über etwas weniger als 100 mm . Der Median der Evapotranspirationssummen liegt bei den zwei am höchsten aufgelösten Simulationen bei ca. 410 mm und nimmt dann mit Verringerung der Auflösung auf 387 mm ab. Ebenso sinken die Mittelwerte über alle Gitterpunkte durch die Verminderung der Auflösung von ungefähr 400 mm auf 383 mm . Bei allen Auflösungen liegen die oberen 50 % der Simulationsergebnisse in einem vergleichs-



(a) Simulationen mit variablen Boden und einem Durchschnittswetter



(b) Simulationen mit variablem Wetter und Boden

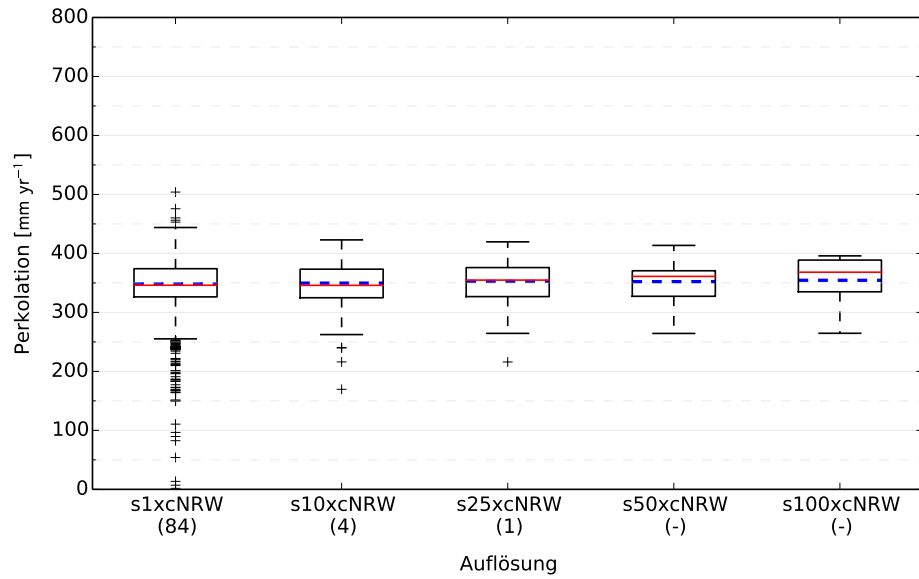
Abbildung 5.21: Box-Whisker-Plots der über 30 Jahre gemittelten, jährlichen Evapotranspiration [mm pro Wachstumsperiode], simuliert in verschiedenen räumlichen Auflösungen. Die durchgezogene, rote Linie stellt den Median dar, die gestrichelte, blaue Linie das arithmetische Mittel. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stehen für die Auflösung [km²] von Boden und Wetter, „NRW“ bezeichnet das mittlere Wetter. Die Zahlen in Klammern zeigen die Anzahl der Werte, die außerhalb des Bereiches der Antennen liegen. Die Länge der Antennen wurde in beide Richtungen auf das eineinhalbfache der Boxlänge begrenzt.

weise engen Bereich, z. B. bei $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung zwischen 410 mm und 423 mm, während die untere Hälfte aller Simulationsergebnisse deutlich mehr streut. Nur bei $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auflösung ist dies nicht ganz so stark ersichtlich.

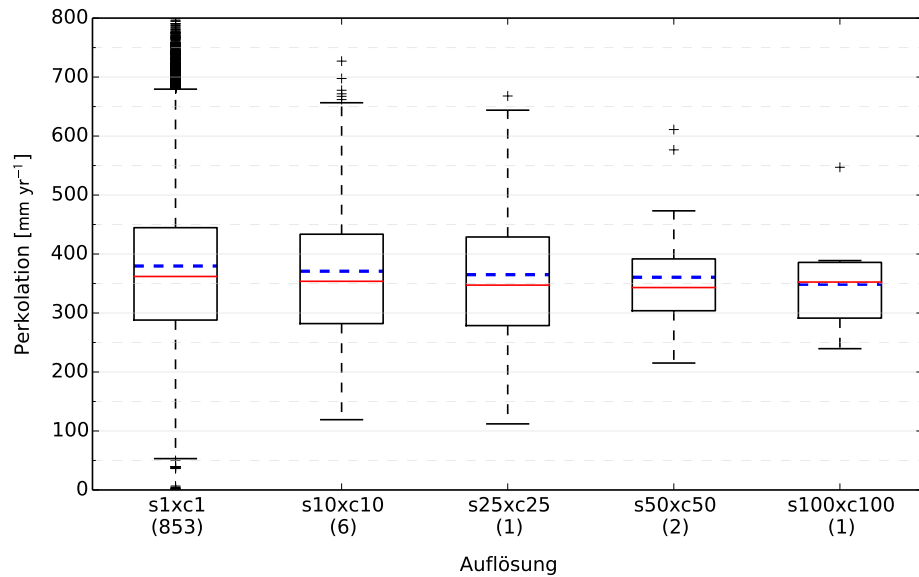
Mit Ausnahme der $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ -Simulation wird das Spektrum der Simulationsergebnisse größer, wenn die Evapotranspiration mit gitterpunktspezifischem Wetter und Boden simuliert wird (Abbildung 5.21b). Auch hier wird deutlich, dass die Reduktion der Auflösung im Prinzip das Spektrum der Simulationsergebnisse verringert, wobei der am größten simulierte Modellauf etwas heraussticht, da die hier simulierten Evapotranspirationssummen sich in einem etwas größeren Bereich als bei der $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ -Simulation befinden. Bei all diesen Modellläufen konzentriert sich ebenfalls ein Großteil der Evapotranspirationssummen in einem kleinen, hohen Bereich, während die untere Hälfte der Simulationsergebnisse ein größeres Spektrum abdeckt. Zusätzlich bewirkte die Verringerung der Auflösung von $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ auf $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ vor allem eine Reduktion der Anzahl geringer Evapotranspirationssummen (vgl. Abschnitt 5.3.2). Zwischen $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ und $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ Auflösung liegt der Median der Evapotranspiration bei etwa 400 mm, der Mittelwert etwa 5 mm bis 10 mm darunter. Bei $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auflösung wurden der Median und der Mittelwert bei etwa 375 mm simuliert.

Der Mittelwert liegt bei den meisten hier analysierten Simulationen etwas unterhalb des Medians, was mit dem vergleichsweise großen Spektrum der Evapotranspiration in der unteren Hälfte der Simulationsergebnisse in Einklang steht. Der dreißigjährige Durchschnitt der Evapotranspiration bei der Simulation mit einem einzigen Gitterpunkt, also mit durchschnittlichem Wetter und Boden, liegt bei 427 mm, was am oberen Rand der Simulationsergebnisse aller anderen Modellläufe liegt. Von Mittelwert und Median der Evapotranspirationssummen der anderen Simulationen ist dieser Wert vergleichsweise weit entfernt.

Die simulierten Perkolationssummen sind als Box-Whisker-Plot in Abbildung 5.22 dargestellt. Bei den Simulationen mit variablem Boden und einem Durchschnittswetter (Abbildung 5.22a) wird ebenso deutlich, dass die Verringerung der Auflösung zu einer Verkleinerung des Wertebereiches führt. Auch hier treten vor allem geringe Perkolationssummen nicht mehr auf, wenn sich die Auflösung verringert. Die Boxen aller Simulationen, die die mittleren 50 % der Werte abbilden, erstrecken sich über einen Bereich von ca. 50 mm a^{-1} . Die Mittelwerte und die Mediane der unterschiedlichen Perkolationssimulationen liegen bei etwa 350 mm a^{-1} . Nur bei den zwei größten Auflösungen ist der Median jeweils etwas erhöht.



(a) Simulationen mit variablen Boden und einem Durchschnittswetter



(b) Simulationen mit variablem Wetter und Boden

Abbildung 5.22: Box-Whisker-Plots der über 30 Jahre gemittelten, jährlichen Perkolations [mm a^{-1}], simuliert in verschiedenen räumlichen Auflösungen. Die durchgezogene, rote Linie stellt den Median dar, die gestrichelte, blaue Linie das arithmetische Mittel. Die Zahlen nach „s“ und „c“ stehen für die Auflösung [km^2] von Boden und Wetter, „NRW“ bezeichnet das mittlere Wetter. Die Zahlen in Klammern zeigen die Anzahl der Werte an, die außerhalb des Bereiches der Antennen liegen. Die Länge der Antennen wurde in beide Richtungen auf das eineinhalbfache der Boxlänge begrenzt.

Wird nun zusätzlich auch das Wetter auf jedem Gitterpunkt variiert, vergrößert sich der Wertebereich der simulierten jährlichen Perkolation in allen Auflösungen deutlich. Dieser erstreckt sich nun bei $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung von 0 mm a^{-1} bis 830 mm a^{-1} , bei $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ Auflösung von $239,5\text{ mm a}^{-1}$ bis $547,1\text{ mm a}^{-1}$. Der Median der Perkolation der einzelnen Modellläufe nimmt durch die Verringerung der Auflösung von etwa 360 mm a^{-1} ($1\text{ km} \times 1\text{ km}$) auf 350 mm a^{-1} ($100\text{ km} \times 100\text{ km}$) ab, der Mittelwert von etwa 380 mm a^{-1} auf 350 mm a^{-1} . Der Mittelwert liegt also zumeist etwas oberhalb des Medians. In Zusammenhang dazu steht, dass sich die obere Hälfte der Simulationsergebnisse über einen deutlich größeren Bereich erstreckt als die untere Hälfte der Simulationsergebnisse.

Wird nur ein einziger Gitterpunkt simuliert beträgt das dreißigjährige Mittel der Perkolation 304 mm a^{-1} . Somit liegt dieser Durchschnittswert der Perkolation im Vergleich zu den Simulationen mit variablem Wetter und Boden innerhalb der mittleren Hälfte aller Simulationsergebnisse, während er im Vergleich zu den Simulationen mit durchschnittlichem Wetter eher niedrig ist.

Aus diesen Darstellungen der simulierten Evapotranspiration und Perkolation wird demzufolge ersichtlich, dass sich durch die Verwendung von durchschnittlichem Wetter und durch die Verringerung der geographischen Auflösung der Eingabedaten das arithmetische Mittel und der Median der Simulationsergebnisse deutlich ändern kann.

In ihrem Modellvergleich berechneten Zhao u. a. (2016) den Mittelwert der in $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ Auflösung simulierten Weizenenerträge der verschiedenen Modelle. Zusätzlich berechneten sie weitere Mittelwerte durch Ziehung von einfachen Stichproben aus der Gesamtheit der Gitterpunkte. Dabei näherte sich mit zunehmender Größe der Stichprobe dieser Mittelwert an die über alle Gitterpunkte gemittelten Kornerträge an.

Der Einfluss der geographischen Auflösung der Eingabedaten auf das Spektrum der Simulationsergebnisse, das mit verringerter Auflösung zunehmend kleiner wird, ist jedoch bei den hier vorgestellten Simulationen der Evapotranspiration und der Perkolation noch größer als der Einfluss auf die arithmetischen Mittel der Simulationsergebnisse. Dies bestätigt das Ergebnis von Van Bussel u. a. (2016), die eine (geschichtete) Stichprobe von etwa 100 Gitterpunkten benötigten, um die Variabilität von simulierten Weizenenerträgen abbilden zu können.

Durch die Verwendung des Durchschnittswetters in Verbindung mit den variablen Böden wurde die Anzahl der Gitterpunkte bei der feinsten Auflösung am stärksten, auf etwa 7,7% aller Gitterpunkte, reduziert. Bei einer Auflösung von $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ wurden trotz der Verwendung des Durchschnittswetters schon über 50% der in die-

ser Auflösung vorhandenen Gitterpunkte simuliert. Bei den zwei größten Auflösungen wurde jeweils nur ein Gitterpunkt ausgespart. Somit bietet sich die Verwendung des Durchschnittswetters vor allem dazu an, Reaktionen des Modells auf unterschiedliches Wetter auszuschließen und somit den Einfluss des Bodens auf die Modellergebnisse zu analysieren. Jedoch wäre keine rein-arithmetische Mittelung im Falle der reduzierten Gitterpunkte sinnvoll. Stattdessen könnte sich eine mögliche Mittelung der Simulationsergebnisse an der Anzahl der ausgelassenen Gitterpunkte des jeweiligen Bodentyps orientieren.

Die Simulationsdauer reduzierte sich durch die Verkleinerung der Anzahl der Gitterpunkte vor allem bei der Simulation mit $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Auflösung, während diese Reduktion bei den gröberen Auflösungen nur einen geringen Einfluss auf die Simulationsdauer hat. Auch erfordert die Verwendung von entsprechend hochaufgelösten Wetterdaten bei $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ und geringerer Auflösung keinen großen Mehraufwand sofern die Wetterdaten prinzipiell vorhanden sind. Somit sind diese Simulationen – falls möglich – jenen mit Durchschnittswetter vorzuziehen.

Kapitel 6

Generelle Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1 Die Transpiration von Mais kann mit der Heat-Ratio-Methode bestimmt werden

Der Saftfluss von Maispflanzen wurde in den letzten Jahren häufig mit der Heat-Balance-Methode (Sakuratani 1981) gemessen (Ding u. a. 2013; Jiang u. a. 2016; Manderscheid u. a. 2015; Wang u. a. 2017), bei der eine Manschette um einen Ast oder den Stamm/Stängel einer Pflanze gewickelt wird. Diese Manschette besteht aus einer Wärmequelle, einem Wärmeflussensor und Wärmefühlern.

Die Heat-Ratio-Methode (Abschnitt 2.4) hingegen, bei der Heiz- und Messnadeln direkt im Stamm oder Stängel einer Pflanze installiert werden, wurde hauptsächlich zur Messung des Saftflusses in Bäumen verwendet (Buckley u. a. 2011; Er-Raki u. a. 2010; Fernández u. a. 2007; Fisher u. a. 2007; Madurapperuma u. a. 2009; Oliveira u. a. 2005; Pfautsch u. a. 2011; Vandegehuchte u. a. 2014). In dieser Dissertation wurde nun gezeigt, dass Saftflusssensoren, die die Heat-Ratio-Methode benutzen, ebenfalls verwendet werden können, um den Wasserfluss in Maispflanzen zu messen. Die Tagessummen der Transpiration, die mithilfe dieser Saftflussmessungen ermittelt wurden, und die Tagessummen der Evapotranspiration, die bei einem Lysimeter-Experiment bestimmt wurden, zeigten gute Übereinstimmung. Der gemessene Tagesgang des Saftflusses konnte auch durch die parallel zu den Messungen durchgeführten Simulationen abgebildet werden. Bei einem anschließenden Feldversuch auf der Forschungsplattform Scheyern wurden mit diesen Saftflusssensoren ebenfalls realistische Tagesgänge des Saftflusses und realistische Tagessummen der Transpiration in Maispflanzen gemessen. Die Aus-

sagekraft dieser Saftflussmessungen wurde mithilfe von Eddy-Kovarianz-Messungen in Verbindung mit Transpirationssimulationen (Xylemflussmodell) verifiziert. Obwohl die Saftflusssensoren prinzipiell gut dazu geeignet sind, auch kleine Saftflussraten zu messen (Burgess u. a. 2001), war jedoch in den Messwerten von zwei der vier Pflanzen gegen Ende der Messperiode im Sommer 2015 vor allem statistisches Rauschen zu erkennen.

Die für diese Dissertation verwendeten Saftflusssensoren bieten den Vorteil, dass sie leicht zu installieren sind. So müssen lediglich mithilfe einer Schablone drei Löcher in den Ast, Stamm oder Stängel einer Pflanze gebohrt und drei Nadeln eingeführt werden. Diese Verletzung der Pflanzen (vgl. Barrett u. a. 1995) stellt jedoch auch gleichzeitig einen der größten Nachteile dieses Messprozesses dar. So müssen (empirisch bestimmte) Verwundungskorrekturen (Burgess u. a. 2001) vorgenommen werden, wodurch Messfehler entstehen können. Weitere Unsicherheiten im Messprozess birgt auch die empirische Berechnung der thermischen Leitfähigkeit der Pflanzen, die jedoch auch bei Saftflussmessungen mit der Heat-Balance-Methode bestimmt werden muss (Sakuratani 1981).

Der Datenlogger ist bei den Heat-Ratio-Sensoren direkt mit den Heiz- und Messnadeln verbunden und das Messintervall sowie die Stärke des ausgesendeten Hitzepulses wird über ein spezielles, einfach zu bedienendes Computerprogramm gesteuert.

Ein Nachteil der Heat-Ratio-Methode ist, dass sie nicht zur Bestimmung des Saftflusses in Pflanzen mit geringen Stängeldurchmessern verwendet werden kann, da die Messnadeln diese Pflanzen zu stark verletzen würden. Deshalb wurden bei den Maispflanzen in dieser Dissertation die Saftflusssensoren erst ab einem Stängeldurchmesser von ca. 1,5 cm installiert. Bei Stängeldurchmessern von weniger als ca. 2 cm kann lediglich ein Temperatursensor der jeweiligen Messnadel verwendet werden, da sich die Temperatursensoren auf der Messnadel in einen Abstand von 1,5 cm zueinander befinden und der Saftfluss nicht zu nah am Rand des Stängels gemessen werden sollte.

Generell kann die Transpiration von kleineren Maispflanzen mit der Heat-Ratio-Methode nicht bestimmt werden, während Heat-Balance-Manschetten schon bei Stängeldurchmessern größer als 2,1 mm anwendbar sind. Ein Vorteil der Heat-Ratio-Sensoren gegenüber Mess-Manschetten ist wiederum, dass auch bei Dickenwachstum des Stängels oder Stamms die Heiz- und Messnadeln nicht neu installiert werden müssen, und dass jeder Messsensor flexibel für die Saftflussmessung in Pflanzen mit verschiedenen Stängel- bzw. Stammdurchmessern eingesetzt werden kann.

6.2 Das Xylemflussmodell ist für Mais anwendbar

Die Simulationen des Wasserflusses in Maispflanzen auf der Forschungsplattform Scheyern mit dem Xylemflussmodell unter Verwendung dreidimensionaler Pflanzenarchitekturen können die Messwerte des Saftflusses, des latenten Wärmeflusses, der Tagesgänge der Stängeldurchmesser und der Bodenwassergehalte größtenteils gut abbilden. Schwächen des Modellansatzes mit der verwendeten Modellkonfiguration liegen jedoch in der Simulation der nächtlichen Transpiration (was hauptsächlich durch das Modell zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration bedingt ist), der längerfristigen Änderung des Stängeldurchmessers und der Tagesmaxima des latenten Wärmeflusses.

Die für diese Simulationen verwendete Konfiguration basiert auf den Modellkonfigurationen früherer Simulationen des Wasserflusses in Bäumen (Bittner u. a. 2012a,b; Hentschel u. a. 2013, 2015; Janott u. a. 2010) und wurde mithilfe von Parametern aus der Fachliteratur an Mais angepasst. Der Wert für die hydraulischen Leitfähigkeiten des oberirdischen Xylems und der Wurzeln wurde iterativ durch mehrere Simulationsläufe ermittelt. So wie es beobachtbare und messbare Unterschiede zwischen verschiedenen Pflanzensorten einer Pflanzenart gibt, können sich prinzipiell auch Modellparameter für die Beschreibung der pflanzeninternen Prozesse von zwei verschiedenen Sorten einer Pflanzenart unterscheiden (vgl. Gayler u. a. 2002).

Die modellinterne Berechnung der Blattfläche von Mais über den Zusammenhang zwischen Blattlänge und -breite (Fournier 1998; Prévot u. a. 1991) kann je nach Länge der einzelnen Blattsegmente, die aus den Architekturdaten der Pflanze ermittelt werden, zu einer Über- oder Unterschätzung der Einzelblattflächen führen. Insbesondere wenn die Transpiration von jungen Maispflanzen simuliert werden soll, müsste jedoch die Fläche der Einzelblätter auf eine andere Art berechnet werden, da sich das Verhältnis von Blattlänge zu Blattbreite bei jungen Blättern deutlich von diesem Verhältnis bei älteren Blättern unterscheidet (Sylvester u. a. 1990).

Eine weitere, vereinfachte Annahme zur Abschätzung der Blattfläche von Bäumen wurde von Bohrer u. a. (2005) getroffen: Blattfläche ist nur an den Endpunkten eines Astes vorhanden und sie ist proportional zur Länge des endsprechenden Endelementes der Pflanzenarchitektur. Da durch diese vereinfachten Berechnungen der Blattfläche für jedes Element der oberirdischen Pflanzenarchitektur jedoch nur der prozentuale Blattflächen-Anteil an der (vorgegebenen) Gesamtblattfläche bestimmt wird, ist dies nicht der dominierende Faktor für die Simulation der Gesamttranspiration der Pflanze. So wären z. B. bei der hier vorgestellten Studie die Tagessummen der simulierten

Transpiration von Mais maximal $0,02 \text{ mm d}^{-1}$ geringer, wenn statt der etwas genaueren Berechnung der Blattflächenverteilung der Ansatz von Bohrer u. a. (2005) verwendet worden wäre.

Eine größere Unsicherheit in den Simulationsergebnissen ist durch die Vorgabe des gemessenen Blattflächenindex und deren empirische Interpolation zwischen den zwei Messzeitpunkten gegeben (vgl. Studien zum Zusammenhang zwischen LAI und Transpiration/Evapotranspiration von Al-Kaisi u. a. 1989; Van Griensven u. a. 2014). Insbesondere gegen Ende des Simulationszeitraums, als potentielle und aktuelle Transpiration den gleichen Wert annahmen, bestimmten hauptsächlich Blattflächenindex und potentielle Evapotranspiration den Wert der simulierten, aktuellen Transpiration. Zu Beginn des Simulationszeitraums als der Boden trocken war simulierte das Xylemflussmodell eine kleinere maximale Transpiration im Vergleich zur potentiellen Transpiration, die durch Blattflächenindex und potentielle Evapotranspiration vorgegeben wurde. Neben der Veränderung von Parametern für die Berechnung der zeitlich interpolierten Blattfläche könnte diese auch mit Pflanzenwachstumsmodellen, z. B. SPASS und CERES (vgl. Lysimeterstudie in Abschnitt 4.2 bzw. Heinlein u. a. 2017), berechnet werden. In einem weiteren Schritt könnte das Xylemflussmodell dann sogar das bestehende Modul von SPASS und CERES zur Berechnung der aktuellen Transpiration ersetzen.

Die Wurzelarchitekturen, die das Xylemflussmodell zur Wasserentnahme aus dem Boden momentan verwenden kann, repräsentieren eher eine Wurzelverteilung als eine realistische Architektur (vgl. auch die Wurzelarchitekturen von Bittner u. a. 2012b; Hentschel u. a. 2013). Dennoch sind die einzelnen Zylinderelemente der in dieser Studie verwendeten Wurzelarchitektur miteinander verbunden. Dadurch sind die zwei Richards-Gleichungen zur Beschreibung des Wasserflusses in der Pflanze und im Boden miteinander gekoppelt (Janott u. a. 2010). Die Verwendung von realistischen Wurzelarchitekturen (vgl. Leitner u. a. 2010) wäre ein weiterer Schritt zur genaueren Beschreibung des Wasserflusses in der Pflanze und des Wasseraustauschs zwischen Pflanze und Boden.

Die erfolgreiche Anwendung des Xylemflussmodells für Mais legt außerdem nahe, dieses bisher ausschließlich zur Simulation des Wasserflusses in Bäumen verwendete Modell für weitere Ackerpflanzen zu parametrisieren. Da dieses mechanistische Modell die Dynamik der Wasseraufnahme durch die Pflanzen im Vergleich zu traditionellen Pflanzenmodellen, die den pflanzeninternen Wasserfluss nicht explizit simulieren, realistischer abbilden kann, könnte es die Auswirkungen von Extremereignissen (z. B. Dürreperioden) auf das Pflanzenwachstum besser beschreiben. Dafür muss das Modell aber noch an zusätzlichen Standorten sowie in weiteren Zeiträumen getestet werden.

6.3 Bewässerungsmaßnahmen können mithilfe von Messungen und Simulationen geplant werden

Die Heat-Ratio-Sensoren für die Messung des Saftflusses können auch verwendet werden, um den Wasserbedarf von Maispflanzen (oder von anderen Pflanzen mit ausreichend großem Stängeldurchmesser) zu ermitteln. Nachdem z. B. in Scheyern zwischen dem 29. Juli und dem 8. August 2015 kein Niederschlag fiel, aber dennoch die Temperatur und die Solarstrahlung hoch war (Abbildung 3.8), wurden an den fünf darauffolgenden Tagen sich tendenziell verringernde Saftflussraten gemessen (Abbildung 3.9). Diese verminderten Saftflussraten sind auf eine geringere Wasseraufnahme durch die Pflanzen aufgrund der Austrocknung des Bodens zurückzuführen (Abbildung 3.6).

Zur besseren Planung von Bewässerungsmaßnahmen in Obst- und Olivenhainen schlagen Fernández u. a. (2007) die Verwendung des Transpirations-Verhältnisses vor (durch Saftflussmessungen ermittelte aktuelle Transpiration geteilt durch die potentielle Transpiration). Fällt das Transpirations-Verhältnis unter einen kritischen Wert, sollten Bewässerungsmaßnahmen eingeleitet werden. Zur Bestimmung der potentiellen Transpiration testeten die Autoren zwei mögliche Methoden: Saftflussmessungen in ausreichend bewässerten Pflanzen und Modellierung der potentiellen Transpiration. Mit beiden Methoden konnte das Transpirations-Verhältnis bestimmt werden. Nachteile einer nicht-limitierenden Wasserversorgung von Bäumen sind jedoch, dass diese stark bewässerten Bäume zu schnell wachsen, dass Nährstoffe zu schnell versickern und dass in vielen Ländern die knappe Ressource Wasser nicht verschwendet werden sollte. Somit identifizieren Fernández u. a. (2007) die Modellierung der potentiellen Transpiration als praktikabler, auch wenn die Modellierung die Messung von standortspezifischen Wetterdaten erfordert.

Eine Einschränkung bei der Verwendung der Heat-Ratio-Sensoren im Feld ist, dass sie eine konstante Stromversorgung benötigen. Diese ließe sich z. B. mithilfe von Solarpanelen und Batterien realisieren, was allerdings mit weiterem Aufwand und Kosten verbunden ist.

Durchmesser-Dendrometer (z. B. DD-S von Ecomatik) könnten als Ergänzung oder als Alternative zur Abschätzung des Saftflusses dienen. Diese Dendrometer können mit eigenen, wettergeschützten Mini-Loggern und einer Batterie ca. ein halbes Jahr lang betrieben werden. Nachteilig ist bei diesen Messgeräten jedoch die im Vergleich zu den Heat-Ratio-Sensoren etwas kompliziertere Installation.

Werden gleichzeitig Saftfluss- und Dendrometermessungen durchgeführt, ergibt sich eine weitere Möglichkeit, den Bewässerungsbedarf von Pflanzen zu ermitteln. De Swaef und Steppe (2010) fanden heraus, dass sich die gemessenen Stängeldurchmesser und der Saftfluss von Tomatenpflanzen bei Bewässerung simultan erhöhen, sofern der Boden vor der Bewässerung sehr trocken war, während sich normalerweise Stängeldurchmesser und Saftfluss konträr verhalten.

Da das Xylemflussmodell die Tagesgänge der gemessenen Stängeldurchmesser und der gemessenen Transpiration gut beschreiben kann, könnte die aktuelle Transpiration bzw. der Wasserbedarf von Einzelpflanzen auch durch Kalibrierung des Xylemflussmodells auf die gemessenen Stängeldurchmesser ermittelt werden. Insbesondere bei schnell wachsenden Ackerpflanzen sollte dann jedoch zusätzlich noch die Entwicklung der Pflanzenarchitektur (z. B. mithilfe von Lindenmayer-Systemen, Lindenmayer 1968) und des Stängeldurchmessers in das Modell integriert werden. Bisher existieren Modelle für Bäume, die den Zuwachs und zusätzlich die täglichen Schwankungen des Stammdurchmessers simulieren können (De Schepper und Steppe 2010; De Swaef u. a. 2015; Steppe u. a. 2006). Für eine verbesserte Simulation des Stängeldurchmessers von Agrarpflanzen müsste hingegen ein Modell entwickelt werden, das das anfängliche Wachstum und bei einsetzender Seneszenz den späteren Rückgang des Stängeldurchmessers abbilden kann.

6.4 Expert-N 5.0 kann als Landoberflächenmodell verwendet werden

Landoberflächenmodelle werden verwendet, um die untere Randbedingung von atmosphärischen Wetter- und Klimamodellen zu quantifizieren (Skamarock u. a. 2008). Auch wenn z. B. das allgemein anerkannte und weit verbreitete Noah-Landoberflächenmodell (Chen u. a. 1996) stetig erweitert wurde, um die Austauschprozesse zwischen Landoberfläche und Atmosphäre besser abzubilden, werden in diesem Modell dennoch viele Prozesse stark vereinfacht beschrieben (Gayler u. a. 2014; Klein u. a. 2017b; Liu u. a. 2016). So werden selbst in der weiterentwickelten Modellversion Noah-MP (Niu u. a. 2011) Blattflächen- oder Wurzelwachstum lediglich mithilfe von empirischen Wachstumsraten und Regressionsgleichungen abgebildet. Die Integration von dynamischem Pflanzenwachstum in Noah-MP ermöglicht hingegen eine bessere Beschreibung der Energiebilanz an der Erdoberfläche und der Austauschprozesse zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre (Gayler u. a. 2014; Kim u. a. 2013; Klein u. a. 2017b; Liu u. a. 2016).

Die Simulationen der aktuellen Evapotranspiration in Nordrhein-Westfalen mit bis zu $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ räumlicher Auflösung (Abschnitt 5.3) zeigen, dass der Wasseraustausch zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre innerhalb einer Region aufgrund unterschiedlicher Böden und unterschiedlichem Wetter/Klima stark divergieren kann. Das Spektrum der Simulationsergebnisse kann zwar auch durch die Wahl von wenigen zu simulierenden Gitterpunkten abgebildet werden (vgl. Analyse der simulierten Weizenerträge von Van Bussel u. a. 2016), die genaue, geographische Zuordnung allerdings nicht. Die Kenntnis dieser Verteilung ist jedoch nötig, um die Austauschprozesse zwischen miteinander gekoppelten Landoberflächen- und Wettermodellen zu simulieren.

Expert-N 5.0 kann schon jetzt mit dem Wetter- und Klimamodell WRF (Skamarock u. a. 2008) gekoppelt betrieben werden. Eine räumlich hochaufgelöste Simulation über einen längeren Zeitraum, bei der die Kopplung zwischen Expert-N und WRF umfassender getestet werden kann, sollte künftig auf einem Hochleistungsrechner durchgeführt werden. Durch die dynamische Repräsentation des Pflanzenwachstums innerhalb von Grasland- und Waldökosystemen sowie von Ackerpflanzenbeständen ist zu erwarten, dass die Austauschprozesse zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre in einem gekoppelten Modell aus Expert-N und WRF realistischer abgebildet werden können als bei dem bisher verwendeten Landoberflächenmodell Noah in Verbindung mit WRF. Somit könnten zukünftige Wetter- und Klimasimulationen verbessert werden.

Aufgrund der modularen Struktur von Expert-N gäbe es auch die Möglichkeit – neben einer vollständigen Kopplung der Modelle Expert-N und WRF – nur Teilprozesse aus Expert-N in das Landoberflächenmodell von WRF zu integrieren.

Das Xylemflussmodell, mit dem momentan die Transpiration von Bäumen und Maispflanzen simuliert werden kann, könnte ebenfalls in einer mit dem WRF-Modell gekoppelten Version von Expert-N angewendet werden. Hierfür wäre jedoch eine Reduktion der Rechenzeit von Vorteil. Diese Reduktion könnte durch eine etwas vereinfachte Modellversion realisiert werden, die nur den vertikalen Wasserfluss entlang des Hauptstammes der Pflanzen simuliert. Die Quellen- und Senkenterme der Richards-Gleichung könnten in diesem Fall durch eine vertikale Verteilung der Wurzellängendichten und des Blattflächenindex definiert werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Das Klima der Erde ändert sich durch die anthropogene Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Diese Treibhausgase werden u. a. von Agrarökosystemen emittiert. Gleichzeitig wird der Klimawandel – bedingt durch die Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der Temperatur sowie durch eine zeitlich und räumlich veränderte Verteilung des Niederschlags – einen Einfluss auf das zukünftige Wachstum von Pflanzen haben. Insbesondere Extremereignisse wie längere Dürreperioden und Starkregenereignisse, deren Häufigkeit zunehmen wird, können die Erträge von Ackerpflanzen verringern.

Die Auswirkungen dieser zukünftigen Extremereignisse (z. B. Wassermangel) auf das Pflanzenwachstum werden von traditionellen Pflanzenwachstumsmodellen, die häufig mit Tageszeitschritten rechnen, nicht oder nur unzureichend abgebildet. Um die Einflüsse von zukünftigem Wassermangel auf das Wachstum von Pflanzen zu simulieren, ist deshalb ein mechanistischer Modellansatz nötig, der nicht nur die potentielle Wurzelwasseraufnahme mit der potentiellen Transpiration direkt in Verbindung setzt, sondern auch den Wasserfluss in der Pflanze explizit berücksichtigt. Mithilfe eines mechanistischen Modells zur Beschreibung des Wasserflusses im Xylem konnten jedoch bisher nur realistische Transpirationswerte von Bäumen simuliert werden.

Im Rahmen dieser Dissertation sollte darauf aufbauend untersucht werden, ob dieses neuartige, mechanistische Modell auch zur Simulation des Wasserflusses in Mais anwendbar ist. Diese Fragestellung erfordert zur Verifizierung des Modells Messungen des Wasserflusses in Maispflanzen und die Prüfung dieser Messdaten durch unabhängige Vergleichsmessungen.

Der Saftfluss, der mit der Heat-Ratio-Methode gemessen wurde, stimmte gut mit der zeitlich hochaufgelösten Lysimeter-Messung der Evapotranspiration überein. Der Zusammenhang zwischen gemessenem Saftfluss und gemessener Evapotranspiration kann

te zusätzlich durch Simulationen der Lysimeter-Wasserbilanz mit dem Modellsystem Expert-N verifiziert werden. Ebenfalls standen erneute Saftflussmessungen in Maispflanzen auf einem Feld der Forschungsplattform Scheyern mit unabhängigen Eddy-Kovarianz-Messungen der Evapotranspiration und mit Messungen der Stängeldurchmesser der Pflanzen in Einklang.

Der Saftfluss und die Stängeldurchmesser von Maispflanzen sowie der latente Wärmefluss wurden mit Expert-N unter Verwendung des neuartigen, für Mais parametrisierten Xylemflussmodell simuliert. Die Simulationsergebnisse wiesen gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Tagesgängen des Saftflusses und des latenten Wärmeflusses sowie mit den täglichen Schwankungsbreiten der Stängeldurchmesser auf. Lediglich das Wachstum und der Rückgang der Stängeldurchmesser sowie einige Tagesmaxima des latenten Wärmeflusses wurden unzureichend durch das Xylemflussmodell abgebildet. Die Simulationen mit dem Xylemflussmodell ermöglichen es, Saftfluss, latenten Wärmefluss und tägliche Schwankungsbreite der Stängeldurchmesser zueinander in Relation zu setzen.

Darüber hinaus wurden Expert-N-Simulationen der Evapotranspiration und der Perkolations für Weizenbestände auf der Fläche Nordrhein-Westfalens über einen Zeitraum von 30 Jahren durchgeführt. Bei diesen Modellrechnungen wurde festgestellt, dass sich sowohl die Mittelwerte als auch das Spektrum der Simulationsergebnisse deutlich ändern können, wenn mit räumlich unterschiedlich aufgelösten Boden- und Wetterdaten simuliert wird.

Aus den Ergebnissen dieser Dissertation können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden: der Saftfluss von Maispflanzen kann mit der Heat-Ratio-Methode gemessen werden. Das Xylemflussmodell ist in der Lage, die Transpiration von Maispflanzen realistisch abzubilden. Da das mechanistische Xylemflussmodell die Dynamik der Wasseraufnahme durch die Pflanzen realistischer als traditionelle Pflanzenwachstumsmodelle abbilden kann, hat es Potential, die Auswirkungen von Extremereignissen auf das Pflanzenwachstum besser zu beschreiben. Dafür muss das Modell aber noch weiter getestet werden.

Unter anderem können mithilfe dieser Erkenntnisse Bewässerungsmaßnahmen genauer geplant und gesteuert werden. Es ist anzunehmen, dass die Verwendung von Expert-N als Landoberflächenmodell für Klimasimulationen, auch inklusive des Xylemflussmodells, zu einer besseren Beschreibung der Austauschprozesse zwischen Landoberfläche und Atmosphäre auf regionaler Skala führen würde. Dadurch könnten regionale Wetter- und Klimasimulationen optimiert werden.

Literaturverzeichnis

- Al-Kaisi, M., L. J. Brun und J. W. Enz (1989). „Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index“. In: *Agricultural and forest meteorology* 48.1-2, S. 111–116.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes und M. Smith (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO - Food und Agriculture Organization of the United Nations. ISBN: 92-5-104219-5. URL: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. Kowalski, P. Martin, P. Berbigier und C. Bernhofer (1999). „Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology“. In: *Advances in Ecological Research Volume 30*, 113–175. ISSN: 0065-2504. DOI: 10.1016/S0065-2504(08)60018-5.
- Baldocchi, D. D. (2003). „Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future“. In: *Global Change Biology* 9.4, 479–492. ISSN: 1365-2486. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x.
- Baldocchi, D. D., B. B. Hincks und T. P. Meyers (1988). „Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods“. In: *Ecology* 69.5, 1331–1340. ISSN: 0012-9658. DOI: 10.2307/1941631.
- Ballester, J., X. Rodó und F. Giorgi (2009). „Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming“. In: *Climate Dynamics* 35.7-8, 1191–1205. ISSN: 1432-0894. DOI: 10.1007/s00382-009-0641-5.
- Barrett, D. J., T. J. Hatton, J. E. Ash und M. C. Ball (1995). „Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia“. In: *Plant Cell Environ* 18.4, 463–469. ISSN: 1365-3040. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1995.tb00381.x.
- Becker, P. und W. R. N. Edwards (1999). „Corrected heat capacity of wood for sap flow calculations“. In: *Tree Physiology* 19.11, 767–768. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/19.11.767.
- Beniston, M., D. B. Stephenson, O. B. Christensen, C. A. T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi und et al. (2007). „Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections“. In: *Climatic Change* 81.S1, 71–95. ISSN: 1573-1480. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z.

- Berliner, P. und D. Oosterhuis (1987). „Effect of root and water distribution in lysimeters and in the field on the onset of crop water stress“. In: *Irrigation Science* 8.4, S. 245–255. ISSN: 1432-1319. DOI: 10.1007/bf00257509.
- Bittner, S., M. Janott, D. Ritter, P. Köcher, F. Beese und E. Priesack (2012a). „Functional–structural water flow model reveals differences between diffuse- and ring-porous tree species“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 158-159, 80–89. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.02.005.
- Bittner, S., N. Legner, F. Beese und E. Priesack (2012b). „Individual tree branch-level simulation of light attenuation and water flow of three *F. sylvatica* L. trees“. In: *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 117.G1. ISSN: 0148-0227. DOI: 10.1029/2011jg001780.
- Bohrer, G., H. Mourad, T. A. Laursen, D. Drewry, R. Avissar, D. Poggi, R. Oren und G. G. Katul (2005). „Finite element tree crown hydrodynamics model (FETCH) using porous media flow within branching elements: A new representation of tree hydrodynamics“. In: *Water Resources Research* 41.11, n/a–n/a. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/2005wr004181.
- Bossel, H. (1996). „TREEDYN3 forest simulation model“. In: *Ecological Modelling* 90.3, 187–227. ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/0304-3800(95)00139-5.
- Brisson, N., B. Itier, J. C. L’Hotel und J. Y. Lorendeau (1998). „Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models“. In: *Ecological Modelling* 107.2-3, 159–169. ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/s0304-3800(97)00215-9.
- Bristow, K. L. und G. S. Campbell (1984). „On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 31.2, S. 159–166. DOI: 10.1016/0168-1923(84)90017-0.
- Brodribb, T. J. und N. M. Holbrook (2004). „Diurnal depression of leaf hydraulic conductance in a tropical tree species“. In: *Plant, Cell and Environment* 27.7, 820–827. ISSN: 1365-3040. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2004.01188.x.
- Buckley, T. N., T. L. Turnbull, S. Pfautsch und M. A. Adams (2011). „Nocturnal water loss in mature subalpine *Eucalyptus delegatensis* tall open forests and adjacent *E. pauciflora* woodlands“. In: *Ecology and Evolution* 1.3, 435–450. ISSN: 2045-7758. DOI: 10.1002/ece3.44.
- Burgess, S. S. O., M. A. Adams, N. C. Turner, C. R. Beverly, C. K. Ong, A. A. H. Khan und T. M. Bleby (2001). „An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants“. In: *Tree Physiology* 21.9, 589–598. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/21.9.589.
- Böhm, W. (1979). *Methods of Studying Root Systems*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/978-3-642-67282-8>. DOI: 10.1007/978-3-642-67282-8.
- Campbell, G. S. (1987). *Soil physics with BASIC - transport models for soil-plant systems: Developments in soil science*. Hrsg. von B. Clothier. Bd. 14. 3. Elsevier BV, 252–254. DOI: 10.1016/0378-3774(87)90019-9.

- Carminati, A., D. Vetterlein, N. Koebernick, S. Blaser, U. Weller und H.-J. Vogel (2012). „Do roots mind the gap?“ In: *Plant and Soil* 367.1-2, 651–661. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/s11104-012-1496-9.
- Carminati, A., D. Vetterlein, U. Weller, H.-J. Vogel und S. E. Oswald (2009). „When Roots Lose Contact“. In: *Vadose Zone Journal* 8.3, S. 805. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2008.0147.
- Cavero, J., E. T. Medina, M. Puig und A. Martínez-Cob (2009). „Sprinkler Irrigation Changes Maize Canopy Microclimate and Crop Water Status, Transpiration, and Temperature“. In: *Agronomy Journal* 101.4, S. 854. ISSN: 1435-0645. DOI: 10.2134/agronj2008.0224x.
- Chen, F., K. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H.-L. Pan, V. Koren, Q. Y. Duan, M. Ek und A. Betts (1996). „Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101.D3, 7251–7268. ISSN: 0148-0227. DOI: 10.1029/95jd02165.
- Childs, S. W. und R. J. Hanks (1975). „Model of Soil Salinity Effects on Crop Growth“. In: *Soil Science Society of America Journal* 39.4, S. 617–622. ISSN: 0361-5995. DOI: 10.2136/sssaj1975.03615995003900040016x.
- Christensen, J. H. und O. B. Christensen (2003). „Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe“. In: *Nature* 421.6925, 805–806. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/421805a.
- Chuang, Y.-L., R. Oren, A. L. Bertozzi, N. Phillips und G. G. Katul (2006). „The porous media model for the hydraulic system of a conifer tree: Linking sap flux data to transpiration rate“. In: *Ecological Modelling* 191.3-4, 447–468. ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.027.
- Clothier, B. E. und S. R. Green (1994). „Rootzone processes and the efficient use of irrigation water“. In: *Agricultural Water Management* 25.1, 1–12. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/0378-3774(94)90048-5.
- Cocoza, C., G. Marino, A. Giovannelli, C. Cantini, M. Centritto und R. Tognetti (2014). „Simultaneous measurements of stem radius variation and sap flux density reveal synchronisation of water storage and transpiration dynamics in olive trees“. In: *Ecohydrology* 8.1, 33–45. ISSN: 1936-0584. DOI: 10.1002/eco.1483.
- Cohen, Y. und Y. Li (1996). „Validating sap flow measurement in field-grown sunflower and corn“. In: *Journal of Experimental Botany* 47.11, 1699–1707. ISSN: 1460-2431. DOI: 10.1093/jxb/47.11.1699.
- Dagum, L. und R. Menon (1998). „OpenMP: an industry standard API for shared-memory programming“. In: *Computational Science & Engineering, IEEE* 5.1, S. 46–55.
- Dai, A., K. E. Trenberth und T. R. Karl (1999). „Effects of Clouds, Soil Moisture, Precipitation, and Water Vapor on Diurnal Temperature Range“. In: *Journal of Climate* 12.8, S. 2451–2473.

- Daly, C. (2006). „Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets“. In: *International Journal of Climatology* 26.6, 707–721. ISSN: 1097-0088. DOI: 10.1002/joc.1322.
- Davenport, D. C. (1967). „Variations of evaporation in time and space I. Study of diurnal changes using evaporimeters and grass lysimeters“. In: *Journal of Hydrology* 5, S. 312–328. DOI: 10.1016/s0022-1694(67)80129-x.
- Dekker, L. W. und C. J. Ritsema (1996). „Preferential Flow Paths in a Water Repellent Clay Soil with Grass Cover“. In: *Water Resources Research* 32.5, 1239–1249. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/96wr00267.
- de Schepper, V. und K. Steppe (2010). „Development and verification of a water and sugar transport model using measured stem diameter variations“. In: *Journal of Experimental Botany* 61.8, 2083–2099. ISSN: 1460-2431. DOI: 10.1093/jxb/erq018.
- de Swaef, T. und K. Steppe (2010). „Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato“. In: *Functional Plant Biology* 37.5, S. 429. ISSN: 1445-4408. DOI: 10.1071/fp09233.
- de Swaef, T., V. De Schepper, M. W. Vandegehuchte und K. Steppe (2015). „Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology“. In: *Tree Physiology* 35.10. Hrsg. von D. Way, 1047–1061. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/tpv080.
- de Vries, D. A. (1952). *The thermal conductivity of soil*. Wageningen, the Netherlands: Mededelingen van Lanbouwhogeschool.
- de Vries, D. A. (1963). „Thermal properties of soils“. In: *Physics of plant environment*. Hrsg. von W. van Wijk. Amsterdam, the Netherlands: Noth-Holland Publishing Co. Kap. Thermal properties of soils, S. 210–235.
- Ding, R., S. Kang, Y. Zhang, X. Hao, L. Tong und T. Du (2013). „Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching“. In: *Agricultural Water Management* 127, 85–96. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.05.018.
- Dornbush, M. E., T. M. Isenhardt und J. W. Raich (2002). „Quantifying Fine-Root Decomposition: An Alternative to Buried Litterbags“. In: *Ecology* 83.11, S. 2985. ISSN: 0012-9658. DOI: 10.2307/3071834.
- Edwards, W. R. N. und N. W. M. Warwick (1984). „Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation“. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research* 27.4, 537–543. ISSN: 1175-8775. DOI: 10.1080/00288233.1984.10418016.
- Engel, T. und E. Priesack (1993). „Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection“. In: Hrsg. von H. J. P. Eijsackers und T. Hamers. Springer Nature. Kap. Expert-N - A Building Block System of Nitrogen Models as Resource for Advice, Research, Water Management and Policy, 503–507. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/978-94-011-2008-1>. DOI: 10.1007/978-94-011-2008-1_110.

- Er-Raki, S., A. Chehbouni, G. Boulet und D. Williams (2010). „Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region“. In: *Agricultural Water Management* 97.11, 1769–1778. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.06.009.
- Ewert, F., M. K. van Ittersum, T. Heckelei, O. Therond, I. Bezlepkina und E. Andersen (2011). „Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems“. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142.1-2, 6–17. ISSN: 0167-8809. DOI: 10.1016/j.agee.2011.05.016.
- Fereres, E., D. Goldhamer, M. Cohen, J. Girona und M. Mata (1999). „Continuous trunk diameter recording can reveal water stress in peach trees“. In: *California Agriculture* 53.4, 21–25. ISSN: 0008-0845. DOI: 10.3733/ca.v053n04p21.
- Fernández, J. E., S. R. Green, H. W. Caspari, A. Diaz-Espejo und M. V. Cuevas (2007). „The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines“. In: *Plant and Soil* 305.1-2, 91–104. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/s11104-007-9348-8.
- Fisher, J. B., D. D. Baldocchi, L. Misson, T. E. Dawson und A. H. Goldstein (2007). „What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California“. In: *Tree Physiology* 27.4, 597–610. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/27.4.597.
- Flury, M., H. Flühler, W. A. Jury und J. Leuenberger (1994). „Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study“. In: *Water Resources Research* 30.7, 1945–1954. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/94wr00871.
- Folland, C. K., J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson und J. W. Hurrell (2009). „The Summer North Atlantic Oscillation: Past, Present, and Future“. In: *J. Climate* 22.5, 1082–1103. ISSN: 1520-0442. DOI: 10.1175/2008jcli2459.1.
- Fournier, C. (1998). „A 3D Architectural and Process-based Model of Maize Development“. In: *Annals of Botany* 81.2, 233–250. ISSN: 0305-7364. DOI: 10.1006/anbo.1997.0549.
- Frensch, J. und E. Steudle (1989). „Axial and Radial Hydraulic Resistance to Roots of Maize (*Zea mays* L.)“. In: *Plant Physiology* 91.2, 719–726. ISSN: 1532-2548. DOI: 10.1104/pp.91.2.719.
- Früh, T. und W. Kurth (1999). „The Hydraulic System of Trees: Theoretical Framework and Numerical Simulation“. In: *Journal of Theoretical Biology* 201.4, 251–270. ISSN: 0022-5193. DOI: 10.1006/jtbi.1999.1028.
- Gabriel, E., G. E. Fagg, G. Bosilca, T. Angskun, J. J. Dongarra, J. M. Squyres, V. Sahay, P. Kambadur, B. Barrett, A. Lumsdaine und et al. (2004). „Open MPI: Goals, Concept, and Design of a Next Generation MPI Implementation“. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 97–104. ISSN: 1611-3349. DOI: 10.1007/978-3-540-30218-6_19.
- Gao, Y., A. Duan, X. Qiu, Z. Liu, J. Sun, J. Zhang und H. Wang (2010). „Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system“. In:

- Agricultural Water Management* 98.1, 199–212. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.08.021.
- Gayler, S., E. Wang, E. Priesack, T. Schaaf und F.-X. Maidl (2002). „Modeling biomass growth, N-uptake and phenological development of potato crop“. In: *Geoderma* 105.3-4, 367–383. ISSN: 0016-7061. DOI: 10.1016/s0016-7061(01)00113-6.
- Gayler, S., T. Wöhling, M. Grzeschik, J. Ingwersen, H.-D. Wizemann, K. Warrach-Sagi, P. Högy, S. Attinger, T. Streck und V. Wulfmeyer (2014). „Incorporating dynamic root growth enhances the performance of Noah-MP at two contrasting winter wheat field sites“. In: *Water Resources Research* 50.2, 1337–1356. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1002/2013wr014634.
- GDNRW (2004). *Bodenkarte 1:50000 (BK50). Karte der schutzwürdigen Böden. Bearbeitungsmaßstab 1:50000*. URL: http://www.gd.nrw.de/bo_dk.htm (besucht am 22.03.2017).
- Gebauer, T., V. Horna und C. Leuschner (2008). „Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species“. In: *Tree Physiology* 28.12, 1821–1830. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/28.12.1821.
- Gholipour, M., S. Choudhary, T. R. Sinclair, C. D. Messina und M. Cooper (2012). „Transpiration Response of Maize Hybrids to Atmospheric Vapour Pressure Deficit“. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 199.3, 155–160. ISSN: 0931-2250. DOI: 10.1111/jac.12010.
- Godwin, D. C. und C. A. Jones (1991). „Nitrogen Dynamics in Soil-Plant Systems“. In: *Modeling plant and soil systems: Agronomy*. Hrsg. von J. Hanks und J. T. Ritchie. Bd. 31. American Society of Agronomy, S. 287–321. ISBN: 978-0-89118-223-8. DOI: 10.2134/agronmonogr31.c13.
- Gong, L., C.-y. Xu, D. Chen, S. Halldin und Y. D. Chen (2006). „Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin“. In: *Journal of Hydrology* 329.3-4, 620–629. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydro.2006.03.027.
- Goudriaan, J. und H. van Laar (1994). *Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises*. Hrsg. von J. Goudriaan und H. van Laar. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Gozubenli, H., M. Kilinc, O. Sener und O. Konuskan (2004). „Effects of Single and Twin Row Planting on Yield and Yield Components in Maize“. In: *Asian Journal of Plant Sciences* 3.2, 203–206. ISSN: 1812-5697. DOI: 10.3923/ajps.2004.203.206.
- Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock und B. Eder (2005). „Fully coupled “online” chemistry within the WRF model“. In: *Atmospheric Environment* 39.37, 6957–6975. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.

- Hansen, J. und M. Sato (2016). „Regional climate change and national responsibilities“. In: *Environmental Research Letters* 11.3. ISSN: 1748-9326. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034009.
- Hansen, S., H. E. Jensen, N. E. Nielsen und H. Svendsen (1990). *DAISY - Soil Plant Atmosphere System Model*. The Royal Veterinary und Agricultural University, Copenhagen, Denmark.
- Haude, W. (1955). *Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise*. Techn. Ber. 11. Deutscher Wetterdienst.
- Heinlein, F., C. Biernath, C. Klein, C. Thieme und E. Priesack (2017). „Evaluation of Simulated Transpiration from Maize Plants on Lysimeters“. In: *Vadose Zone Journal* 16.1, S. 16. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2016.05.0042.
- Hentschel, R., S. Bittner, M. Janott, C. Biernath, J. Holst, J. P. Ferrio, A. Gessler und E. Priesack (2013). „Simulation of stand transpiration based on a xylem water flow model for individual trees“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 182-183, 31–42. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.08.002.
- Hentschel, R., R. Hommel, W. Poschenrieder, R. Grote, J. Holst, C. Biernath, A. Gessler und E. Priesack (2015). „Stomatal conductance and intrinsic water use efficiency in the drought year 2003: a case study of European beech“. In: *Trees* 30.1, 153–174. ISSN: 1432-2285. DOI: 10.1007/s00468-015-1284-2.
- Herbst, M., L. Kappen, F. Thamm und R. Vanselow (1996). „Simultaneous measurements of transpiration, soil evaporation and total evaporation in a maize field in northern Germany“. In: *Journal of Experimental Botany* 47.12, 1957–1962. ISSN: 1460-2431. DOI: 10.1093/jxb/47.12.1957.
- Herbst, M., W. Fialkiewicz, T. Chen, T. Pütz, D. Thiéry, C. Mouvet, G. Vachaud und H. Vereecken (2005). „Intercomparison of Flow and Transport Models Applied to Vertical Drainage in Cropped Lysimeters“. In: *Vadose Zone Journal* 4.2, S. 240. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2004.0070.
- Hinsinger, P., G. R. Gobran, P. J. Gregory und W. W. Wenzel (2005). „Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes“. In: *New Phytologist* 168.2, 293–303. ISSN: 1469-8137. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01512.x.
- Hoffmann, H., G. Zhao, S. Asseng, M. Bindi, C. Biernath, J. Constantin, E. Coucheney, R. Dechow, L. Doro, H. Eckersten, T. Gaiser, B. Grosz, F. Heinlein, B. T. Kassie, K.-C. Kersebaum, C. Klein, M. Kuhnert, E. Lewan, M. Moriondo, C. Nendel, E. Priesack, H. Raynal, P. P. Roggero, R. P. Rötter, S. Siebert, X. Specka, F. Tao, E. Teixeira, G. Trombi, D. Wallach, L. Weihermüller, J. Yeluripati und F. Ewert (2016). „Impact of Spatial Soil and Climate Input Data Aggregation on Regional Yield Simulations“. In: *PLOS ONE* 11.4. Hrsg. von D. A. Lightfoot, e0151782. DOI: 10.1371/journal.pone.0151782.

- Huck, M. G., K. Ishihara, C. M. Peterson und T. Ushijima (1983). „Soybean Adaptation to Water Stress at Selected Stages of Growth“. In: *PLANT PHYSIOLOGY* 73.2, 422–427. ISSN: 1532-2548. DOI: 10.1104/pp.73.2.422.
- Hunter, J. D. (2007). „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3, 90–95. ISSN: 1521-9615. DOI: 10.1109/mcse.2007.55.
- Hutson, J. L. und R. J. Wagenet (1992). *LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3.0*. Techn. Ber. 93-3. Ithaca, NY, USA: Cornell University.
- Jagdhuber, T., M. Kohling, I. Hajsek und K. P. Papathanassiou (2012). „Soil moisture retrieval under vegetation: Validation on TERENO observatories“. In: *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. DOI: 10.1109/igarss.2012.6352563.
- Janott, M., S. Gayler, A. Gessler, M. Javaux, C. Klier und E. Priesack (2010). „A one-dimensional model of water flow in soil-plant systems based on plant architecture“. In: *Plant and Soil* 341.1-2, 233–256. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/s11104-010-0639-0.
- Jeong, S., S.-H. Park und C.-H. Kim (2013). „Simulation of Morphology Changes in Drying Leaves“. In: *Computer Graphics Forum* 32.1, S. 204–215. ISSN: 0167-7055. DOI: 10.1111/cgf.12009.
- Jiang, X., S. Kang, F. Li, T. Du, L. Tong und L. Comas (2016). „Evapotranspiration partitioning and variation of sap flow in female and male parents of maize for hybrid seed production in arid region“. In: *Agricultural Water Management* 176, 132–141. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.05.022.
- Jones, C. A. und J. R. Kiniry (1986). *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*. Hrsg. von C. A. Jones und J. R. Kiniry. Texas A&M University Press, Temple TX, USA.
- Kargol, A. (1996). „An integrated approach to water transport in a plant over long distances“. In: *Journal of Biological Physics* 22.3, S. 157–173. ISSN: 1573-0689. DOI: 10.1007/BF00417648.
- Katul, G., R. Leuning und R. Oren (2003). „Relationship between plant hydraulic and biochemical properties derived from a steady-state coupled water and carbon transport model“. In: *Plant, Cell and Environment* 26.3, 339–350. ISSN: 1365-3040. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2003.00965.x.
- Keating, B., P. Carberry, G. Hammer, M. Probert, M. Robertson, D Holzworth, N. Huth, J. Hargreaves, H Meinke, Z Hochman und et al. (2003). „An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation“. In: *European Journal of Agronomy* 18.3-4, 267–288. ISSN: 1161-0301. DOI: 10.1016/s1161-0301(02)00108-9.
- Keil, C., F. Heinlein und G. C. Craig (2013). „The convective adjustment time-scale as indicator of predictability of convective precipitation“. In: *Quarterly Journal of the*

- Royal Meteorological Society* 140.679, 480–490. ISSN: 0035-9009. DOI: 10.1002/qj.2143.
- Kim, K., M. Kang, H. Jeong und J. Kim (2013). „Comparison of Crop Growth and Evapotranspiration Simulations between Noah Multi Physics Model and CERES-Rice Model“. In: *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 15.4, 282–290. ISSN: 1229-5671. DOI: 10.5532/kjafm.2013.15.4.282.
- Klein, C., C. Thieme, F. Heinlein, C. Biernath, G. Gerl und E. Priesack (2017a). „Modeling surface energy fluxes from a patchwork of fields with differing soil-crop combinations over two years in South-East Germany.“ Nicht publiziert.
- Klein, C., C. Biernath, F. Heinlein, C. Thieme, A. K. Gilgen, M. Zeemann und E. Priesack (2017b). „Vegetation growth models improve surface layer flux simulations of a temperate grassland“. Eingereicht bei *Vadose Zone Journal*.
- Klier, C. (2007). *Environmental fate of the herbicide glyphosate in the soil-plant system: Monitoring and modelling using large-scale weighing lysimeter*. Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan XVI.
- Kolditz, O., S. Bauer, L. Bilke, N. Böttcher, J. O. Delfs, T. Fischer, U. J. Görke, T. Kalbacher, G. Kosakowski, C. I. McDermott und et al. (2012). „OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media“. In: *Environmental Earth Sciences* 67.2, 589–599. ISSN: 1866-6299. DOI: 10.1007/s12665-012-1546-x.
- Kool, D., N. Agam, N. Lazarovitch, J. Heitman, T. Sauer und A. Ben-Gal (2014). „A review of approaches for evapotranspiration partitioning“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 184, 56–70. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.09.003.
- Korn, S. (2004). „Experimentelle Untersuchung der Wasseraufnahme und der hydraulischen Eigenschaften des Wurzelsystems von sechs heimischen Baumarten.“ Diss. Georg-August-Universität Göttingen.
- Kovats, R., R. Valentini, L. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell und J.-F. Soussana (2014). „Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“. In: Hrsg. von V. Barros, C. Field, D. Dokken, M. Mastrandrea, K. Mach, T. Bilir, M. Chatterjee, K. Ebi, Y. Estrada, R. Genova, B. Girma, E. Kissel, A. Levy, S. MacCracken, P. Mastrandrea und L. White. Cambridge, United Kingdom und New York, USA: Cambridge University Press. Kap. Europe, S. 1267–1326.
- Kraus, H. (2004a). „Die Luftfeuchtigkeit“. In: *Die Atmosphäre der Erde*. Springer Nature. Kap. 8, S. 67–94. DOI: 10.1007/3-540-35017-9_9.
- (2004b). „Die Strahlung“. In: *Die Atmosphäre der Erde*. Springer Nature. Kap. 9, S. 95–136. DOI: 10.1007/3-540-35017-9_9.
- Krause, A. (2007). *Foundations of GTK+ Development*. Springer Nature. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/978-1-4302-0386-5>. DOI: 10.1007/978-1-4302-0386-5.

- Kreienkamp, F., A. Spekat und W. Enke (2013). „The Weather Generator Used in the Empirical Statistical Downscaling Method, WETTREG“. In: *Atmosphere* 4.2, S. 169–197.
- Kroes, J. und J. Roelsma (2007). „Simulation of water and nitrogen flows on field scale; application of the SWAP–ANIMO model for the Müncheberg data set“. In: *Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems: Proceedings of the workshop on “Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems” held on 14–16 June 2004 in Müncheberg, Germany*. Hrsg. von K. C. Kersebaum, J.-M. Hecker, W. Mirschel und M. Wegehenkel. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 111–128. ISBN: 978-1-4020-4479-3. DOI: 10.1007/978-1-4020-4479-3_9.
- Köcher, P., T. Gebauer, V. Horna und C. Leuschner (2009). „Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies“. In: *Annals of Forest Science* 66.1, 101–101. ISSN: 1297-966X. DOI: 10.1051/forest/2008076.
- LANUV (2017). *Fachinformation Klimaanpassung*. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. URL: <http://www.klimaanpassung-karte.nrw.de/?feld=Wasserwirtschaft%20und%20Hochwasserschutz> (besucht am 23.03.2017).
- Latham, J., R. Cumani, I. Rosati und M. Bloise (2014). *Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE) datadata Beta-Release Version 1.0 - 2014*. GLC. URL: http://www.glcn.org/downs/prj/glcshare/GLC_SHARE_beta_v1.0_2014.pdf (besucht am 28.06.2016).
- Lawrence, D. M., P. E. Thornton, K. W. Oleson und G. B. Bonan (2007). „The Partitioning of Evapotranspiration into Transpiration, Soil Evaporation, and Canopy Evaporation in a GCM: Impacts on Land–Atmosphere Interaction“. In: *Journal of Hydrometeorology* 8.4, 862–880. ISSN: 1525-7541. DOI: 10.1175/jhm596.1.
- Leitner, D., S. Klepsch, G. Bodner und A. Schnepf (2010). „A dynamic root system growth model based on L-Systems“. In: *Plant and Soil* 332.1-2, 177–192. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/s11104-010-0284-7. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0284-7>.
- Leuning, R., A. Condon, F. Dunin, S. Zegelin und O. Denmead (1994). „Rainfall interception and evaporation from soil below a wheat canopy“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 67.3-4, 221–238. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/0168-1923(94)90004-3.
- Li, L., D. Nielsen, Q. Yu, L. Ma und L. Ahuja (2010). „Evaluating the Crop Water Stress Index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the North China plain“. In: *Agricultural Water Management* 97.8, 1146–1155. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.09.015.
- Li, Y., J. S. Sperry und M. Shao (2009). „Hydraulic conductance and vulnerability to cavitation in corn (*Zea mays* L.) hybrids of differing drought resistance“. In: *Environmental and Experimental Botany* 66.2, 341–346. ISSN: 0098-8472. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.02.001.

- Lide, D. R. (1991). *Handbook of Chemistry and Physics*. Hrsg. von B. Graetzman. Bd. 10. 2. Elsevier BV, ix–x. DOI: 10.1016/0165-9936(91)85111-4.
- Lindenmayer, A. (1968). „Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs“. In: *Journal of Theoretical Biology* 18.3, 280–299. ISSN: 0022-5193. DOI: 10.1016/0022-5193(68)90079-9.
- Lindner, M., M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbati, J. Garcia-Gonzalo, R. Seidl, S. Delzon, P. Corona, M. Kolström und et al. (2010). „Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems“. In: *Forest Ecology and Management* 259.4, 698–709. ISSN: 0378-1127. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.023.
- Link, S. O., M. E. Thiede und M. G. v. Bavel (1998). „An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter“. In: *Journal of Experimental Botany* 49.326, 1583–1587. ISSN: 1460-2431. DOI: 10.1093/jxb/49.326.1583.
- Liu, C., X. Zhang und Y. Zhang (2002). „Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 111.2, 109–120. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/s0168-1923(02)00015-1.
- Liu, X., F. Chen, M. Barlage, G. Zhou und D. Niyogi (2016). „Noah-MP-Crop: Introducing dynamic crop growth in the Noah-MP land surface model“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121.23, 13,953–13,972. ISSN: 2169-897X. DOI: 10.1002/2016jd025597.
- Loos, C., S. Gayler und E. Priesack (2007). „Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters“. In: *Journal of Hydrology* 335.3-4, 259–270. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.11.017.
- Madurapperuma, W. S., T. M. Bleby und S. S. Burgess (2009). „Evaluation of sap flow methods to determine water use by cultivated palms“. In: *Environmental and Experimental Botany* 66.3, 372–380. ISSN: 0098-8472. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.04.002.
- Manderscheid, R., M. Erbs, S. Burkart, K.-P. Wittich, F.-J. Löpmeier und H.-J. Weigel (2015). „Effects of Free-Air Carbon Dioxide Enrichment on Sap Flow and Canopy Microclimate of Maize Grown under Different Water Supply“. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 202.4, 255–268. ISSN: 0931-2250. DOI: 10.1111/jac.12150.
- Manoli, G., S. Bonetti, E. Scudiero, F. Morari, M. Putti und P. Teatini (2015). „Modeling Soil–Plant Dynamics: Assessing Simulation Accuracy by Comparison with Spatially Distributed Crop Yield Measurements“. In: *Vadose Zone Journal* 14.12, S. 1–13. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2015.05.0069.
- Marques, D. J., M. M. Ferreira, A. K. d. S. Lobato, W. A. d. Freitas, J. d. A. Carvalho, E. D. Ferreira und F. Broetto (2016). „Potential of calcium silicate to mitigate water deficiency in maize“. In: *Bragantia* 75.3, 275–285. ISSN: 1678-4499. DOI: 10.1590/1678-4499.446.

- Marshall, D. C. (1958). „Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport.“ In: *PLANT PHYSIOLOGY* 33.6, 385–396. ISSN: 1532-2548. DOI: 10.1104/pp.33.6.385.
- Mauder, M. und Foken (2015). *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update)*. Universität Bayreuth.
- Meijninger, W. M. L., F. Beyrich, A. Lüdi, W. Kohsiek und H. A. R. D. Bruin (2005). „Scintillometer-Based Turbulent Fluxes of Sensible and Latent Heat Over a Heterogeneous Land Surface – A Contribution to Litfass-2003“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 121.1, 89–110. ISSN: 1573-1472. DOI: 10.1007/s10546-005-9022-8.
- Mengel, D. B. und S. A. Barber (1974). „Development and Distribution of the Corn Root System Under Field Conditions1“. In: *Agronomy Journal* 66.3, S. 341. ISSN: 0002-1962. DOI: 10.2134/agronj1974.00021962006600030002x.
- Milly, P. C. D., K. A. Dunne und A. V. Vecchia (2005). „Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate“. In: *Nature* 438.7066, 347–350. ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/nature04312.
- Mishra, S. und J. Parker (1989). „Effects of parameter uncertainty on predictions of unsaturated flow“. In: *Journal of Hydrology* 108, 19–33. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90276-x.
- Monteith, J. L. (1965). „Evaporation and Environment“. In: *19th Symposia of the Society for Experimental Biology*. Bd. 19. University Press, Cambridge, S. 205–234.
- (1981). „Evaporation and surface temperature“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107.451, 1–27. ISSN: 1477-870X. DOI: 10.1002/qj.49710745102.
- Mosaddeghi, M., A. Mahboubi und A. Safadoust (2009). „Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran“. In: *Soil and Tillage Research* 104.1, 173–179. ISSN: 0167-1987. DOI: 10.1016/j.still.2008.10.011.
- Mossadeghi-Björklund, M., J. Arvidsson, T. Keller, J. Koestel, M. Lamandé, M. Larsbo und N. Jarvis (2016). „Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil“. In: *Soil and Tillage Research* 156, 91–98. ISSN: 0167-1987. DOI: 10.1016/j.still.2015.09.013.
- Mrkonjic Fuka, M., M. Engel, A. Hagn, J. C. Munch, M. Sommer und M. Schloter (2008). „Changes of Diversity Pattern of Proteolytic Bacteria over Time and Space in an Agricultural Soil“. In: *Microbial Ecology* 57.3, 391–401. ISSN: 1432-184X. DOI: 10.1007/s00248-008-9416-5.
- Mualem, Y. (1976). „A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media“. In: *Water Resour. Res.* 12.3, 513–522. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/wr012i003p00513.
- Nash, J. und J. Sutcliffe (1970). „River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles“. In: *Journal of Hydrology* 10.3, 282–290. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

- Nendel, C., R. Wieland, W. Mirschel, X. Specka, C. Guddat und K. Kersebaum (2013). „Simulating regional winter wheat yields using input data of different spatial resolution“. In: *Field Crops Research* 145, 67–77. ISSN: 0378-4290. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.02.014.
- Nicoullaud, B., D. King und F. Tardieu (1994). „Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics“. In: *Plant and Soil* 159.2, 245–254. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/bf00009287.
- Nimah, M. N. und R. J. Hanks (1973). „Model for Estimating Soil Water, Plant, and Atmospheric Interrelations: I. Description and Sensitivity“. In: *Soil Science Society of America Journal* 37.4, S. 522–527. ISSN: 0361-5995. DOI: 10.2136/sssaj1973.03615995003700040018x.
- Niu, G.-Y., Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero und et al. (2011). „The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements“. In: *Journal of Geophysical Research* 116.D12. ISSN: 0148-0227. DOI: 10.1029/2010jd015139.
- Nonhebel, S. (1994). „The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation models“. In: *Agricultural Systems* 44.4, 377–396. ISSN: 0308-521X. DOI: 10.1016/0308-521x(94)90194-k.
- Oertli, J. J. (1993). „Effect of cavitation on the status of water in plants“. In: Hrsg. von M. Borghetti, J. Grace und A. Raschi. Cambridge University Press (CUP). Kap. 3, 27–40. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/9780511753305>. DOI: 10.1017/cbo9780511753305.004.
- Oliveira, R. S., T. E. Dawson, S. S. O. Burgess und D. C. Nepstad (2005). „Hydraulic redistribution in three Amazonian trees“. In: *Oecologia* 145.3, 354–363. ISSN: 1432-1939. DOI: 10.1007/s00442-005-0108-2.
- Palmer, T. N. und J. Räisänen (2002). „Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate“. In: *Nature* 415.6871, 512–514. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/415512a.
- Parton, W. J., D. S. Ojima, C. V. Cole und D. S. Schimel (1994). „A General Model for Soil Organic Matter Dynamics: Sensitivity to Litter Chemistry, Texture and Management“. In: *Quantitative Modeling of Soil Forming Processes*. Hrsg. von R. Bryant und R. Arnold. Soil Science Society of America, S. 147–167. DOI: 10.2136/sssaspepub39.c9.
- Peng, Y., J. Niu, Z. Peng, F. Zhang und C. Li (2010). „Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil“. In: *Field Crops Research* 115.1, S. 85–93. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.10.006.
- Penman, H. L. (1948). „Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass“. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 193.1032, S. 120–145. DOI: 10.1098/rspa.1948.0037.

- Perämäki, M., E. Nikinmaa, S. Sevanto, H. Ilvesniemi, E. Siivola, P. Hari und T. Vesala (2001). „Tree stem diameter variations and transpiration in Scots pine: an analysis using a dynamic sap flow model“. In: *Tree Physiology* 21.12-13, 889–897. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/21.12-13.889.
- Pfautsch, S., C. Keitel, T. L. Turnbull, M. J. Braimbridge, T. E. Wright, R. R. Simpson, J. A. O'Brien und M. A. Adams (2011). „Diurnal patterns of water use in *Eucalyptus victrix* indicate pronounced desiccation-rehydration cycles despite unlimited water supply“. In: *Tree Physiology* 31.10, 1041–1051. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/tpr082.
- Phogat, V., M. Skewes, J. Cox, J. Alam, G. Grigson und J. Šimůnek (2013). „Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree“. In: *Agricultural Water Management* 127, 74–84. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.05.017.
- Prescott, J. (1940). „Evaporation from a water surface in relation to solar radiation“. In: *Transactions of the Royal Society of South Australia* 64, S. 114–118.
- Priesack, E. (2006). *Expert-N Dokumentation der Modellbibliothek - FAM-Bericht 60, Forschungsverbund Agrarökosysteme München - Erfassung, Prognose und Bewertung nutzungsbedingter Veränderungen in Agrarökosystemen und deren Umwelt*. pp 310. Hyronimus Buchproduktions GmbH, München, Germany.
- Priesack, E. und C. Bauer (2002). *Expert-N Datenmanagement - FAM-Bericht 59, Forschungsverbund Agrarökosysteme München - Erfassung, Prognose und Bewertung nutzungsbedingter Veränderungen in Agrarökosystemen und deren Umwelt*. pp 120. Hyronimus Buchproduktions GmbH, München, Germany.
- Priesack, E. und S. Gayler (2009). „Agricultural crop models: Concepts of resource acquisition and assimilate partitioning“. In: *Progress in Botany*. Hrsg. von U. E. Lüttge, W. Beyschlag und J. Murata. Bd. 70. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, S. 195–222.
- Prévot, L., F. Aries und P. Monestiez (1991). „Modélisation de la structure géométrique du maïs“. In: *Agronomie* 11.6, 491–503. ISSN: 0249-5627. DOI: 10.1051/agro:19910606.
- Ray, J. D. und T. R. Sinclair (1998). „The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress“. In: *Journal of Experimental Botany* 49.325, S. 1381–1386.
- Rebetez, M., H. Mayer, O. Dupont, D. Schindler, K. Gartner, J. P. Kropp und A. Menzel (2006). „Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis“. In: *Annals of Forest Science* 63.6, 569–577. ISSN: 1297-966X. DOI: 10.1051/forest:2006043.
- Reth, S., W. Graf, O. Gefke, R. Schilling, H. K. Seidlitz und J. C. Munch (2007). „Whole-year-round Observation of N₂O Profiles in Soil: A Lysimeter Study“. In: *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 8.2, 129–137. ISSN: 1573-2940. DOI: 10.1007/s11267-007-9165-3.

- Richards, L. A. (1931). „Capillary conduction of liquids through porous mediums“. In: *Physics* 1.5, S. 318. ISSN: 0148-6349. DOI: 10.1063/1.1745010.
- Ritchie, J. T. (1991). „Wheat Phasic Development“. In: *Modeling plant and soil systems: Agronomy*. Hrsg. von J. Hanks und J. T. Ritchie. Bd. 31. American Society of Agronomy. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/978-0-89118-223-8>. DOI: 10.2134/agronmonogr31.c3.
- Ritchie, J. T. und D. Godwin (1989). *CERES Wheat 2.0 - Documentation for version 2 of the CERES wheat model*. URL: http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/ (besucht am 28.06.2016).
- Ritchie, J., D. C. Godwin und S. Otter-Nacke (1987). *CERES-Wheat—A simulation model of wheat growth and development*. Techn. Ber. College Station, TX, USA: Texas A&M Univ. Press.
- Rochette, P., E. Pattey, R. Desjardins, L. Dwyer, D. Stewart und P. Dubé (1991). „Estimation of maize (*Zea mays* L.) canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 54.2-4, 241–261. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/0168-1923(91)90008-e.
- Roleček, J., M. Chytrý, M. Hájek, S. Lvončík und L. Tichý (2007). „Sampling design in large-scale vegetation studies: Do not sacrifice ecological thinking to statistical purism!“ In: *Folia Geobotanica* 42.2, 199–208. ISSN: 1874-9348. DOI: 10.1007/bf02893886.
- Rosa, R., T. Ramos und L. Pereira (2016). „The dual Kc approach to assess maize and sweet sorghum transpiration and soil evaporation under saline conditions: Application of the SIMDualKc model“. In: *Agricultural Water Management* 177, 77–94. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.06.028.
- Rosenzweig, C. und M. L. Parry (1994). „Potential impact of climate change on world food supply“. In: *Nature* 367.6459, 133–138. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/367133a0.
- Rosenzweig, C., J. Elliott, D. Deryng, A. C. Ruane, C. Müller, A. Arneth, K. J. Boote, C. Folberth, M. Glotter, N. Khabarov und et al. (2013). „Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.9, 3268–3273. ISSN: 1091-6490. DOI: 10.1073/pnas.1222463110.
- Sakuratani, T. (1981). „A Heat Balance Method for Measuring Water Flux in the Stem of Intact Plants“. In: *Journal of Agricultural Meteorology* 37.1, 9–17. ISSN: 1881-0136. DOI: 10.2480/agrmet.37.9.
- Sau, F., K. J. Boote, W. M. Bostick, J. W. Jones und M. I. Mínguez (2004). „Testing and Improving Evapotranspiration and Soil Water Balance of the DSSAT Crop Models“. In: *Agronomy Journal* 96.5, S. 1243–1257. ISSN: 1435-0645. DOI: 10.2134/agronj2004.1243.

- Schaaf, T. (1998). „Integration von Modellansätzen zur Bodenbearbeitung und Düngung in den Baukasten für Stickstoffsimulationsmodelle EXPERT-N.“ Diss. Zentralstelle für Agrardokumentation und -information (ZADI), Bonn.
- Schaap, M. G., F. J. Leij und M. T. van Genuchten (2001). „ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions“. In: *Journal of Hydrology* 251.3-4, 163–176. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
- Schreinemachers, P. und T. Berger (2011). „An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems“. In: *Environmental Modelling & Software* 26.7, 845–859. ISSN: 1364-8152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.02.004.
- Schröder, P., B. Huber, U. Olazábal, A. Kämmerer und J. Munch (2002). „Land use and sustainability: FAM Research Network on Agroecosystems“. In: *Geoderma* 105.3-4, 155–166. ISSN: 0016-7061. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00101-x. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00101-x](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00101-x).
- Sharp, R. E. und W. J. Davies (1985). „Root Growth and Water Uptake by Maize Plants in Drying Soil“. In: *Journal of Experimental Botany* 36.9, 1441–1456. ISSN: 1460-2431. DOI: 10.1093/jxb/36.9.1441.
- Skaggs, T. H., J. A. Poss, P. J. Shouse und C. M. Grieve (2006a). „Irrigating Forage Crops with Saline Waters: 1. Volumetric Lysimeter Studies“. In: *Vadose Zone Journal* 5.3, S. 815–823. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2005.0119.
- Skaggs, T. H., P. J. Shouse und J. A. Poss (2006b). „Irrigating Forage Crops with Saline Waters; 2. Modeling root uptake and drainage“. In: *Vadose Zone Journal* 5.3, S. 824–837. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2005.0120.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X.-y. Huang, W. Wang und J. G. Powers (2008). *A description of the Advanced Research WRF Version 3*. technical report. NCAR/UCAR.
- Slevin, D., S. F. B. Tett und M. Williams (2015). „Multi-site evaluation of the JULES land surface model using global and local data“. In: *Geoscientific Model Development* 8.2, 295–316. ISSN: 1991-9603. DOI: 10.5194/gmd-8-295-2015.
- Sommer, M., M. Wehrhan, M. Zipprich, U. Weller, W. zu Castell, S. Ehrlich, B. Tandler und T. Selige (2003). „Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale“. In: *Geoderma* 112.3-4, 179–196. ISSN: 0016-7061. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00305-1.
- Sperry, J. S., F. R. Adler, G. S. Campbell und J. P. Comstock (1998). „Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model“. In: *Plant, Cell and Environment* 21.4, 347–359. ISSN: 1365-3040. DOI: 10.1046/j.1365-3040.1998.00287.x.
- Sperry, J. S., U. G. Hacke, R. Oren und J. P. Comstock (2002). „Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply“. In: *Plant, Cell and Environment* 25.2, 251–263. ISSN: 1365-3040. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00799.x.

- Sperry, J. S. (2000). „Hydraulic constraints on plant gas exchange“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 104.1, 13–23. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00144-1.
- Stainforth, D. A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D. J. Frame, J. A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J. M. Murphy und et al. (2005). „Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases“. In: *Nature* 433.7024, 403–406. ISSN: 1476-4679. DOI: 10.1038/nature03301.
- Steppe, K. und R. Lemeur (2007). „Effects of ring-porous and diffuse-porous stem wood anatomy on the hydraulic parameters used in a water flow and storage model“. In: *Tree Physiology* 27.1, 43–52. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/27.1.43.
- Steppe, K., D. J. W. De Pauw, R. Lemeur und P. A. Vanrolleghem (2006). „A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth“. In: *Tree Physiology* 26.3, 257–273. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/26.3.257.
- Steudle, E., R. Oren und E.-D. Schulze (1987). „Water Transport in Maize Roots : Measurement of Hydraulic Conductivity, Solute Permeability, and of Reflection Coefficients of Excised Roots Using the Root Pressure Probe“. In: *Plant Physiology* 84.4, S. 1220–1232. DOI: 10.1104/pp.84.4.1220.
- Stocker, T., D. Qin, G.-K. Plattner, L. Alexander, S. Allen, N. Bindoff, F.-M. Bréon, J. Church, S. E. U. Cubasch, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J. Gregory, D. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. K. Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G. Meehl, I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L. Talley, D. Vaughan und S.-P. Xie (2014). „Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“. In: Hrsg. von T. Stocker, D. D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P. Midgley. Cambridge, United Kingdom und New York, USA: Cambridge University Press (CUP). Kap. Technical Summary, 31–116. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/9781107415324>. DOI: 10.1017/cbo9781107415324.005.
- Stumpp, C., P. Maloszewski, W. Stichler und J. Fank (2009). „Environmental isotope ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrological data to assess water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study lysimeter station “Wagna” (Austria)“. In: *Journal of Hydrology* 369.1-2, 198–208. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydro.2009.02.047.
- Stumpp, C., W. Stichler, M. Kandolf und J. Šimůnek (2012). „Effects of Land Cover and Fertilization Method on Water Flow and Solute Transport in Five Lysimeters: A Long-Term Study Using Stable Water Isotopes“. In: *Vadose Zone Journal* 11.1, S. 258–271. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2011.0075.
- Swanson, R. H. (1983). *Numerical and experimental analyses of implanted-probe heat pulse velocity theory*. University of Alberta, Edmonton, Canada.

- Sylvester, A. W., W. Z. Cande und M. Freeling (1990). „Division and differentiation during normal and liguleless-1 maize leaf development“. In: *Development* 110.3, S. 985–1000.
- Thieme, C. (2017). „Measurements and Modeling of Energy and Greenhouse Gas Fluxes in heterogeneous cropprop ecosystems“. In Vorbereitung. Diss. TU München.
- Thornley, J (1997). „Temperate Grassland Responses to Climate Change: an Analysis using the HURkey Pasture Model“. In: *Annals of Botany* 80.2, 205–221. ISSN: 0305-7364. DOI: 10.1006/anbo.1997.0430.
- Todd, R. W., N. L. Klocke, G. W. Hergert und A. M. Parkhurst (1991). „Evaporation from soil influenced by crop shading, crop residue, and wetting regime“. In: *Transactions of the ASAE* 34.2, 0461–0466. ISSN: 2151-0059. DOI: 10.13031/2013.31684.
- Tolk, J., T. Howell, J. Steiner, D. Krieg und A. Schneider (1995). „Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water in improving irrigation efficiency“. In: *Irrigation Science* 16.2. ISSN: 1432-1319. DOI: 10.1007/bf00189165.
- Troen, I. B. und L. Mahrt (1986). „A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 37.1-2, 129–148. ISSN: 1573-1472. DOI: 10.1007/bf00122760.
- Troost, C. und T. Berger (2014). „Dealing with Uncertainty in Agent-Based Simulation: Farm-Level Modeling of Adaptation to Climate Change in Southwest Germany“. In: *American Journal of Agricultural Economics* 97.3, 833–854. ISSN: 1467-8276. DOI: 10.1093/ajae/aau076.
- Tyree, M. T., E. L. Fiscus, S. D. Wullschleger und M. A. Dixon (1986). „Detection of Xylem Cavitation in Corn under Field Conditions“. In: *PLANT PHYSIOLOGY* 82.2, 597–599. ISSN: 1532-2548. DOI: 10.1104/pp.82.2.597.
- UMS AG (2016). *UMS - Geschichte*. Deutsch. UMS. URL: <http://www.ums-muc.de/de/unternehmen/geschichte/> (besucht am 30.06.2016).
- Upmanis, H., I. Eliasson und S. Lindqvist (1998). „The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)“. In: *International Journal of Climatology* 18.6, 681–700. ISSN: 1097-0088. DOI: 10.1002/(sici)1097-0088(199805)18:6<681::aid-joc289>3.0.co;2-1.
- van Bussel, L. G., F. Ewert, G. Zhao, H. Hoffmann, A. Enders, D. Wallach, S. Asseng, G. A. Baigorria, B. Basso, C. Biernath, D. Cammarano, J. Chryssanthacopoulos, J. Constantin, J. Elliott, M. Glotter, F. Heinlein, K.-C. Kersebaum, C. Klein, C. Nendel, E. Priesack, H. Raynal, C. C. Romero, R. P. Rötter, X. Specka und F. Tao (2016). „Spatial sampling of weather data for regional crop yield simulations“. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 220, 101–115. ISSN: 0168-1923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.014.
- Vandegehuchte, M. W., S. S. O. Burgess, A. Downey und K. Steppe (2014). „Influence of stem temperature changes on heat pulse sap flux density measurements“. In: *Tree Physiology* 35.4, 346–353. ISSN: 1758-4469. DOI: 10.1093/treephys/tpu068.

- van der Walt, S., S. C. Colbert und G. Varoquaux (2011). „The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation“. In: *Computing in Science & Engineering* 13.2, 22–30. ISSN: 1521-9615. DOI: 10.1109/mcse.2011.37.
- van Genuchten, M. T. (1980). „A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils“. In: *Soil Science Society of America Journal* 44.5, S. 892–898. ISSN: 0361-5995. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- van Griensven, A., S. Maharjan und T. Alemayehu (2014). „Improved simulation of evapotranspiration for land use and climate change impact analysis at catchment scale“. In: *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Hrsg. von D. Ames u. a. San Diego, CA, S. 2386.
- van Ittersum, M., P. Leffelaar, H van Keulen, M. Kropff, L Bastiaans und J Goudriaan (2003). „On approaches and applications of the Wageningen crop models“. In: *European Journal of Agronomy* 18.3-4, 201–234. ISSN: 1161-0301. DOI: 10.1016/s1161-0301(02)00106-5.
- van Wart, J., P. Grassini und K. G. Cassman (2013). „Impact of derived global weather data on simulated crop yields“. In: *Global Change Biology* 19.12, 3822–3834. ISSN: 1354-1013. DOI: 10.1111/gcb.12302.
- Vereecken, H., J. Maes und J. Feyen (1990). „Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties“. In: *Soil Science* 149.1, 1–12. ISSN: 0038-075X. DOI: 10.1097/00010694-199001000-00001.
- Vereecken, H., R. Kasteel, J. Vanderborght und T. Harter (2007). „Upscaling Hydraulic Properties and Soil Water Flow Processes in Heterogeneous Soils“. In: *Vadose Zone Journal* 6.1, S. 1. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2006.0055.
- Verroust, A. und F. Lazarus (2000). „Extracting skeletal curves from 3D scattered data“. In: *The Visual Computer* 16.1, 15–25. ISSN: 1432-2315. DOI: 10.1007/pl00007210.
- Walter, I. A., R. G. Allen, R. Elliott, D. Itenfisu, P. Brown, M. E. Jensen, B. Mecham, T. A. Howell, R. Snyder, S. Eching, T. Spofford, M. Hattendorf, D. Martin, R. H. Cuenca und J. L. Wright (2005). *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. American Society of Civil Engineers.
- Wang, E. (1997). *Development of a generic process-oriented model for simulation of crop growth*. Munchen, Deutschland: Herberg Utz Verlag.
- Wang, E. und T. Engel (1998). „Simulation of phenological development of wheat crops“. In: *Agricultural Systems* 58.1, 1–24. ISSN: 0308-521X. DOI: 10.1016/s0308-521x(98)00028-6.
- (2000). „SPASS: a generic process-oriented crop model with versatile windows interfaces“. In: *Environmental Modelling & Software* 15.2, 179–188. ISSN: 1364-8152. DOI: 10.1016/s1364-8152(99)00033-x.
- Wang, Y., X. Zhang, X. Xiao, J. Heitman, R. Horton und T. Ren (2017). „An Empirical Calibration for Heat-Balance Sap-Flow Sensors in Maize“. In: *Agronomy Journal*. ISSN: 0002-1962. DOI: 10.2134/agronj2016.10.0611.

- Wassenaar, T, P Lagacherie, J. Legros und M. Rounsevell (1999). „Modelling wheat yield responses to soil and climate variability at the regional scale“. In: *Climate Research* 11, 209–220. ISSN: 1616-1572. DOI: 10.3354/cr011209.
- Wegehenkel, M. (2000). „Test of a modelling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches“. In: *Ecological Modelling* 129.1, 39–64. ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/s0304-3800(00)00221-0.
- Wegehenkel, M. und H. H. Gerke (2013). „Comparison of real evapotranspiration measured by weighing lysimeters with simulations based on the Penman formula and a crop growth model“. In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 61.2. ISSN: 0042-790X. DOI: 10.2478/johh-2013-0021.
- Weiler, M. (2016). „Macropores and preferential flow-a love-hate relationship“. In: *Hydrological Processes* 31.1, 15–19. ISSN: 0885-6087. DOI: 10.1002/hyp.11074.
- Wiesler, F. und W. J. Horst (1994). „Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions“. In: *Plant and Soil* 163.2, 267–277. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/bf00007976.
- Wilcox, J. C. (1963). „Effects of weather on evaporation from Bellani plates and evapotranspiration from lysimeters“. In: *Canadian Journal of Plant Science* 43.1, 1–11. ISSN: 1918-1833. DOI: 10.4141/cjps63-001.
- Willmott, C. J. (1981). „ON THE VALIDATION OF MODELS“. In: *Physical Geography* 2.2, S. 184–194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213. eprint: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Winkler, J. B., H. Lang, W. Graf, S. Reth und J. C. Munch (2009). „Experimental setup of field lysimeters for studying effects of elevated ozone and below-ground pathogen infection on a plant-soil-system of juvenile beech (*Fagus sylvatica* L.)“. In: *Plant and Soil* 323.1-2, 7–19. ISSN: 1573-5036. DOI: 10.1007/s11104-009-9936-x.
- Wu, Y., T. Liu, P. Paredes, L. Duan und L. S. Pereira (2015). „Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: Evapotranspiration partitioning and capillary rise“. In: *Agricultural Water Management* 152, 222–232. ISSN: 0378-3774. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.01.016.
- Xiao, X., T. J. Sauer, J. W. Singer, R. Horton, T. Ren und J. L. Heitman (2016). „Partitioning Evaporation and Transpiration in a Maize Field Using Heat-Pulse Sensors for Evaporation Measurement“. In: *Transactions of the ASABE* 59.2, S. 591–599. DOI: 10.13031/trans.59.11059.
- Xu, H., N. Gossett und B. Chen (2007). „Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees“. In: *ACM Transactions on Graphics* 26.4, S. 1–19. ISSN: 0730-0301. DOI: 10.1145/1289603.1289610.
- Yang, Z., T. R. Sinclair, M. Zhu, C. D. Messina, M. Cooper und G. L. Hammer (2012). „Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit“. In: *Environmental and Experimental Botany* 78, 157–162. ISSN: 0098-8472. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2011.12.034.

- Yin, X. und H. van Laar (2005). *Crop Systems Dynamics*. Wageningen Academic Publishers. ISBN: <http://id.crossref.org/isbn/978-90-8686-539-0>. DOI: 10.3920/978-90-8686-539-0.
- Zhang, L., K. Hickel, W. R. Dawes, F. H. S. Chiew, A. W. Western und P. R. Briggs (2004). „A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration“. In: *Water Resources Research* 40.2. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/2003wr002710.
- Zhao, G., B. A. Bryan, D. King, Z. Luo, E. Wang, U. Bende-Michl, X. Song und Q. Yu (2013). „Large-scale, high-resolution agricultural systems modeling using a hybrid approach combining grid computing and parallel processing“. In: *Environmental Modelling & Software* 41, 231–238. ISSN: 1364-8152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.08.007.
- Zhao, G., H. Hoffmann, J. Yeluripati, S. Xenia, C. Nendel, E. Coucheney, M. Kuhnert, F. Tao, J. Constantin, H. Raynal, E. Teixeira, B. Grosz, L. Doro, R. Kiese, H. Eckersten, E. Haas, D. Cammarano, B. Kassie, M. Moriondo, G. Trombi, M. Bindi, C. Biernath, F. Heinlein, C. Klein, E. Priesack, E. Lewan, K.-C. Kersebaum, R. Rötter, P. P. Roggero, D. Wallach, S. Asseng, S. Siebert, T. Gaiser und F. Ewert (2016). „Evaluating the precision of eight spatial sampling schemes in estimating regional means of simulated yield for two crops“. In: *Environmental Modelling & Software* 80, S. 100–112. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.02.022.
- Šimůnek, J., K. Huang und M. T. van Genuchten (1998). *The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0*. Techn. Ber. 144. Riverside, CA., USA: USDA-ARS, U.S. Salinity Laboratory.