

Machbarkeitsstudie – Rohstoffkartierung Bayern

Schlussbericht

Impressum

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design
Department of Civil and Environmental Engineering

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB)
Arcisstraße 21
80333 München

Autor:innen

Iryna Takser M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

Mitarbeitende

Christina Meier-Dotzler, M.Eng.

Projektzeitraum

Dezember 2020 – Februar 2022

Das Projekt wurde finanziert durch das Bayerische Landesamt für Umwelt.

München, Februar 2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Abkürzungsverzeichnis.....	6
Abstract.....	7
Zusammenfassung.....	8
1. Ausgangslage und Problemdarstellung.....	9
2. Projektziele und Aufgabenstellung.....	11
3. Projektrahmen.....	12
4. Angewandte Methoden.....	13
5. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse.....	14
5.1. Ist-Zustand der verbauten Materialien.....	14
5.1.1. Methodenanalyse zur Materialerfassung des Wohngebäudebestandes.....	14
5.1.2. Analyse der Dateninfrastruktur, Datenverfügbarkeit und Datenbeschaffung.....	19
5.1.3. Methodik zur Bestimmung des Materiallagers der Wohngebäude in Bayern.....	25
5.1.4. Validierung der entwickelten Methode.....	27
5.1.5. Graue Emissionen (CO ₂ -Gehalt) des Materiallagers der bayerischen Wohngebäude.....	29
5.2. Zukünftige Materialströme.....	30
5.2.1. Bestimmung relevanter Einflussfaktoren auf die zukünftigen Materialströme und Definition der Entwicklungsszenarien.....	30
5.2.2. Analyse der Dateninfrastruktur, Datenverfügbarkeit und Datenbeschaffung.....	33
5.2.3. Methodik zur Bestimmung der zukünftigen Materialströme aus dem Wohngebäudebestand.....	36
5.2.4. Zukünftig anfallende Stoffströme aus dem bayerischen Wohngebäudebestand..	37
5.2.5. Validierung des Modells.....	40
5.2.6. Recyclingfähigkeit und potenzielle Rezyklatanteile.....	42
6. Fazit.....	48
7. Empfehlungen und Handlungshinweise.....	49
8. Ausblick.....	50
9. Literaturverzeichnis.....	52
Tabellenverzeichnis.....	55
Anhang A.....	56
Anhang B.....	58
Anhang C.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Material-Input im Hochbau in Deutschland im Jahr 2010, basierend jeweils auf den Ergebnissen der Bottom-Up und der Top-Down Methode, eigene Darstellung nach [7].....	15
Abbildung 2: Statistik der Primärparameterverwaltung für Parameter und Datenquellen; die Farben der Kreise verdeutlichen die Menge der Datensätze von Blau (sehr wenige) bis Rot (ca. 80.000). [21]	22
Abbildung 3: Verfügbarkeit der georeferenzierten Baujahre von Gebäuden der befragten Kommunen, eigene Darstellung.....	23
Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Baualtersklassen im Wohngebäudebestand für die vier größten, vier mittlere, die vier kleinsten Kommunen Bayerns sowie der jeweilige Durchschnitt, eigene Darstellung nach [23]	24
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Methodik zur Bestimmung des Materiallagers der Wohngebäude in Bayern, eigene Darstellung.....	25
Abbildung 6: Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen, eigene Darstellung, nach [23] und [19]	26
Abbildung 7: Materiallager des Wohngebäudebestandes in München in Mio. Tonnen, eigene Darstellung nach [23] und [19]	27
Abbildung 8: Vergleich verschiedener Studien zum Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen, eigene Darstellung nach [24] und [26].....	28
Abbildung 9: Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen nach der Personenbezogenen Methode, eigene Darstellung nach [24].....	28
Abbildung 10: Graue Emissionen verschiedener Baustoffgruppen des bayerischen Wohngebäudebestandes in Tonnen CO ₂ -Äquivalente aus der Herstellungsphase der Materialien, eigene Darstellung nach [23] und [18].....	29
Abbildung 11: Vergleich der prozentualen Verteilung der Wohngebäude in Bayern & in München nach Gebäudeart und nach Baujahren, eigene Darstellung nach [23]	34
Abbildung 12: Anteilige Zusammensetzung des Stoffdepots im Wohngebäudebestand in Bayern und in München, eigene Darstellung nach [23] und [19]	34
Abbildung 13: Gebäudeverteilung in Bayern nach Erstellungsjahr der Gebäude, eigene Darstellung nach [23], [34], [35]	35
Abbildung 14: Dichtefunktion der Normalverteilung. Szenario 1: Erwartungswert = 80; Szenario 2: Erwartungswert = 100, eigene Darstellung	37
Abbildung 15: Anzahl der Wohngebäudeabgänge nach Gebäudetyp und Jahr; Szenario 1: Erwartungswert = 80 Jahre; Szenario 2: Erwartungswert = 100 Jahre; eigene Darstellung.....	38
Abbildung 16: Anfallende Stoffströme durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 1: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre, eigene Darstellung	39

Abbildung 17: Anfallende Stoffströme durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 2: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 100 Jahre, eigene Darstellung	39
Abbildung 18: Anfallende Baumaterialuntergruppen durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 1: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre, eigene Darstellung.....	40
Abbildung 19: Aufkommen und Verbleib ausgewählter Bauabfälle in Deutschland im Jahr 2018, eigene Abbildung nach [41]	44
Abbildung 20: Verbleib der zukünftig aus dem Wohngebäudebestand anfallenden Materialien (Szenario 1), eigene Darstellung	45
Abbildung 21: Beispiele der vier Oberkategorien der Bau- und Abbruchabfälle. Von links nach rechts: biotische, fossile, mineralische, metallische Stoffe. [40].....	46

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BRI	Bruttorauminhalt
EFH	Einfamilienhaus
ENPB	Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene-Monomer
E/ZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
GIS	Geoinformationssystem
GMH	Großmehrfamilienhaus
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LoD	Level of Detail
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MFH	Mehrfamilienhaus
RH	Reihenhaus
t	Tonne
TUM/ TU München	Technische Universität München

Abstract

The present study investigates the feasibility of raw material mapping of residential buildings in Bavaria. Furthermore, a model for the description of the future material flows of this sector is presented.

In a first step, existing methods for mapping residential building stocks are identified with the help of literature research. Thereupon, the existing data infrastructure, availability as well as the possibilities of data acquisition are identified. A methodology is defined that allows to determine the Bavarian housing stock with existing information. By closing the data gaps, an extrapolation to the anthropogenic stock of residential buildings is performed.

In a further step, an extended methodology is described that illustrates the handling of data gaps. Thus, the dynamic processes of the stock with regard to its material flows are shown on the basis of two selected influencing factors, the expected lifetime of the buildings and the recyclability of the accruing materials. The influencing factors are defined by literature analyses as well as by expert interviews. They will be linked in a mathematical model in such a way that future material types, quantities and their whereabouts can be determined.

Finally, a catalog of measures is derived from this, which shows the necessary steps for a circular material management in the building construction sector.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht die Machbarkeit einer Rohstoffkartierung der Wohngebäude in Bayern. Weiterhin wird ein Modell zur Beschreibung der zukünftigen Stoffströme dieses Sektors dargestellt.

In einem ersten Schritt werden mit Hilfe von Literaturrecherchen bereits existierende Methoden zur Erfassung von Wohngebäudebeständen aufgezeigt. Daraufhin wird die bestehende Dateninfrastruktur, -verfügbarkeit sowie die Möglichkeiten der Datenbeschaffung identifiziert. Es wird eine Methodik definiert, die es erlaubt, mit bestehenden Informationen den bayerischen Wohnbestand zu bestimmen. Datenlücken werden geschlossen und eine Hochrechnung zum anthropogenen Lager der Wohngebäude wird durchgeführt.

In einem weiteren Schritt wird eine erweiterte Methodik beschrieben, die den Umgang mit Datenlücken veranschaulicht. Damit werden die dynamischen Prozesse des Bestandes im Hinblick auf seine Materialflüsse anhand von zwei ausgewählten Einflussfaktoren, der erwarteten Lebensdauer der Gebäude und der Recyclingfähigkeit der anfallenden Stoffe, aufgezeigt. Die Einflussfaktoren werden durch Literaturanalysen sowie durch Expertenbefragungen definiert. Sie werden in einem mathematischen Modell so miteinander verknüpft, dass daraus die zukünftig anfallenden Materialarten, -mengen und deren Verbleib bestimmt werden können.

Schließlich wird daraus ein Maßnahmenkatalog abgeleitet, der die notwendigen Schritte für eine kreisläufige Materialwirtschaft im Hochbausektor aufzeigt.

1. Ausgangslage und Problemdarstellung

In Bayern eine Rohstoffkartierung des anthropogenen Lagers zu etablieren, ist in vielerlei Hinsicht notwendig. Denn zum einen sehen die Verbände der bayerischen Bau- und Baustoff- sowie Garten- und Landschaftsbauwirtschaft den derzeitigen Umgang mit Bauabfällen als primären Kostentreiber und sie fordern, dass das Thema der Entsorgungssicherheit stärker in den Fokus gerückt wird. Darüber hinaus gibt es in Bayern regional bereits spürbare Deponieengpässe, die weite Transportwege für Bauabfälle zur Folge haben [1]. Doch im Kontext der Vermeidung von weiteren umfangreichen Flächenverbräuchen und des Klima- und Umweltschutzes kann die Antwort auf eine Wahrung der Entsorgungssicherheit nicht ausschließlich die Erschließung weiterer Deponieflächen sein, sondern es müssen auch Überlegungen zu neuen Materialkreisläufen angestrebt werden.

Neben der Problematik der Entsorgung bzw. Deponierung bietet das anthropogene Lager in Deutschland ein enormes Rohstoffvermögen, das neben Infrastrukturen und langlebigen Gütern vor allem in Bauwerken zu finden ist [2]. Verknüpft mit zukünftigen Entwicklungsszenarien zu Lebensdauern und Abrissen etc. könnten die verbauten Stoffmengen bei einer Weiterverwendung wesentlich zur Verbesserung einer Ressourceneffizienz und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes im Bausektor beitragen, Deponieengpässe mildern und gleichzeitig den ökologischen und energetischen Lebenszyklus eines Bauwerks positiv beeinflussen.

Ein weiterer Aspekt ist das schon heute erkennbare zunehmende Versorgungsrisiko bei der Bereitstellung von Rohstoffen für Bautätigkeiten. Beispielsweise ist Sand in einer für das Bauwesen relevanten Form von regionaler Knappheit betroffen [3]. Darüber hinaus herrscht auch bei der Beschaffung von Metallen (z.B. Stahl und Aluminium) eine zunehmende Abhängigkeit von Importen aus Drittländern [4]. Ein Großteil, der für die deutsche Wirtschaft strategisch relevanten Metalle, wird derzeit importiert [4].

Um den steigenden Kosten und den Herausforderungen der Ver- und Entsorgungssicherheit entgegenzuwirken und den Wohngebäudebestand nachhaltiger zu entwickeln, muss der Einsatz von Sekundärrohstoffen und die Etablierung von Materialkreisläufen forciert werden. Insbesondere die derzeit im Gebäudebestand gebundenen Stoffe stellen ein großes Potenzial dar, um Primärstoffe zu substituieren und einzusparen.

Die Mengen, Zusammensetzung und Qualitäten der verbauten Stoffe sind hingegen nicht ausreichend bekannt, um diese als Sekundärrohstoff bedenkenlos einzusetzen. Vor allem auf regionaler und urbaner Ebene herrscht ein Wissensdefizit, das es zu beheben gilt. Da mineralische Stoffe innerhalb lokaler Bezugsräume gehandelt werden, ist dies von entscheidender Relevanz.

Für strategische Planungen werden daher Werkzeuge benötigt, die es erlauben, die im bayerischen Gebäudebestand verbauten Materialien zu quantifizieren und zu lokalisieren. Diese Werkzeuge sind derzeit noch nicht ausreichend vorhanden. Eine Erhebung dieser Art dient als

Grundlage für ein strategisches Stoffstrom- und Ressourcenmanagement sowie für weitere strategische Planungen (z. B. Ermittlung von zukünftigen Potentialen von Recyclingbaustoffen, benötigten Anlagenkapazitäten [z.B. Deponiekapazitäten], oder Versorgungsdefiziten).

Im Rahmen der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Matthias Heinrich am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München (TUM), wurde ein Rohstoffmodell für Wohngebäude entwickelt, das eine stoffliche Erhebung des Wohngebäudebestands auf Stadtebene ermöglicht [5]. Dies wurde an Hand eines Münchner Fallbeispiels erarbeitet. Ferner beschäftigt sich der Lehrstuhl intensiv mit georeferenzierten 3D-Gebäudemodellen und deren Verwendbarkeit zur Berechnung verschiedener großflächiger Energie- und Stoffstrommodelle. Auf dieser Basis können durch weiterführende Berechnungen und Modellentwicklungen Aussagen zu den oben genannten Punkten (z.B. Potenzial an Recyclingbaustoffen, zeitliches Auftreten der Baustoffe, Anteil von zu deponierenden Stoffen usw.) getroffen werden. Dabei soll eine bayernweit flächendeckende Übertragbarkeit und Erweiterung der bisher vorhandenen Methoden geprüft werden. Ferner gilt es sie zu validieren und derzeitige Datenlücken zu identifizieren und zu schließen, um die Rohstoffstrategie Bayerns zu unterstützen.

2. Projektziele und Aufgabenstellung

Um Strategien zur Umsetzung und Etablierung eines nachhaltigen und zukunftsorientierten Stoffstrommanagements in Bayern zu entwickeln, muss in einem ersten Schritt die stoffliche Zusammensetzung des Gebäudebestands großflächig erhoben werden. Deshalb wurde im Rahmen dieses Projekts die Machbarkeit einer flächendeckenden Kartierung des anthropogenen Lagers, insbesondere der verbauten Stoffe im Wohngebäudebestand in Bayern und die daraus zu erwartenden Materialströme untersucht. Hierbei wurde angestrebt, die am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen entwickelten Methoden und bisherigen Erkenntnisse zu Stoffstrommodellen zu bündeln, zu erweitern und an regionale Gegebenheiten anzupassen. Dies bedeutet, dass eine Schnittstelle geschaffen werden sollte, um typische Materialkennwerte mit repräsentativen 3D-Gebäudemodellen zu verknüpfen. Damit können in einem weiteren Schritt großflächige Hochrechnungen durchgeführt werden können. Neben den gängigen mineralischen und metallischen Stoffen wurde ebenfalls die Möglichkeit zur Erfassung von potenziellen Gebäudeschadstoffen (z.B. Asbest) oder anderen Einfluss nehmenden Faktoren diskutiert. Dadurch sollte deutlich gemacht werden, welche Sekundärrohstoffe theoretisch nutzbar sind. Darüber hinaus trug diese Studie dazu bei, dass alle für eine Rohstoffkartierung erforderlichen Gebäudedaten definiert wurden und so eine Grundlage für eine bayernweit einheitliche Datenerhebung geschaffen wurde. Eine bayernweit einheitliche Erhebung zu Gebäudedaten kann in nachfolgenden Studien auch für andere Hochrechnungen, wie z.B. Ökobilanzierungen verwendet werden.

3. Projektrahmen

Das Projekt wurde in einem Zeitrahmen vom 01.12.2020 – 28.02.2022 bearbeitet. Die Laufzeit der Durchführung betrug insgesamt 15 Monate. Die wissenschaftliche Arbeit erfolgte durch den Lehrstuhl ENPB an der TU München. Dabei fanden regelmäßige Abstimmungen sowie mehrfache Arbeitstreffen mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt statt, bei denen die Projektergebnisse abgestimmt und die Forschungsziele geschärft wurden.

Der Aufbau der Studie gliedert sich in 4 Arbeitspakete (AP):

AP1 - Analyse von Methoden zur Erfassung des Wohngebäudebestandes

AP2 - Bestimmung Wohnbestand: Dateninfrastruktur, Datenverfügbarkeit und Datenbeschaffung

AP3 - Bestimmung Materialstrom: Einflussfaktoren und mögliche Entwicklungsszenarien

AP4 - Maßnahmenkatalog: Umsetzung einer bayernweiten Rohstoffkartierung des Wohngebäudebestandes und seiner verbauten Stoffe

Zeitlich bauten die Arbeitspakete auf einander auf. Die Arbeitspakete 1 – 3 konzentrierten sich insbesondere auf die inhaltliche Forschungsarbeit. Das Arbeitspaket 4 fasste die wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammen. Vor dem Start des Arbeitspakets 3 fand ein Arbeitstreffen mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt statt, bei dem die relevanten Einflussfaktoren sowie die Entwicklungsszenarien gemeinsam abgestimmt wurden. Die Endergebnisse des Projekts wurden dem Bayerischen Landesamt für Umwelt in einer Präsentation vorgestellt sowie mit dem vorliegenden Schlussbericht vorgelegt.

4. Angewandte Methoden

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts erfolgt nach einer systematischen Vorgehensweise. Die Analyse der einzelnen Themen begann jeweils mit einer Literaturrecherche. Damit wurde der aktuelle Stand der Forschung und der Technik erfasst. In einem weiteren Schritt fand die Datenerhebung der benötigten Angaben statt. Datenlücken wurden durch alternative Informationsquellen und Hochrechnungen geschlossen, sodass neue Berechnungsmodelle entwickelt werden konnten. Durch die Auswertung der Ergebnisse wurden Erkenntnisse gewonnen und daraus Handlungsempfehlungen sowie weitere Forschungslücken abgeleitet.

Eine grundlegende Methode stellt die umfassende Literaturrecherche zu verschiedenen Themen dieser Studie dar. Als Basis diente dazu die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Matthias Heinrich am Lehrstuhl ENPB der Technischen Universität München [5]. Weiterführende Quellen wurden zum einen durch das s.g. Schneeballsystem identifiziert. Zum anderen wurden verschiedene Literaturdatenbanken durchsucht, um zusätzliche Informationsquellen zu erfassen und diese bzgl. ihrer Relevanz für die Forschungsarbeit zu bewerten. Die verwendeten Quellen sind dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

Die Prüfung nach den vorhandenen Daten sowie deren Erhebung erfolgt durch eigene Recherchen in den gängigen Online-Suchmaschinen sowie auf den Webseiten der entsprechenden Ämter. Zusätzlich wurden die Behörden persönlich kontaktiert (z.B. das Bayerische Landesamt für Statistik). Hierdurch konnten weitere Wissenslücken geschlossen werden sowie Unklarheiten geklärt werden.

Ferner wurden Umfragen und Interviews durchgeführt. Um die Datenverfügbarkeit bei den einzelnen Kommunen Bayerns zu erfahren, wurden ausgewählte Kommunen des Freistaates kontaktiert und befragt. Bei der Wahl der Kommunen wurde auf die verschiedenen Größen der Gemeinden geachtet, um ein möglichst breites Spektrum des bayerischen Bestands abzudecken. Darüber hinaus wurden Interviews mit Experten aus der Abriss- und der Recyclingbranche durchgeführt. Diese unterstützten die Beantwortung der Forschungsfragen aus der Sicht der Praxis. Die Auswahl der Experten erfolgte mit der Unterstützung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Zur Vorbereitung wurde ein Fragenkatalog erstellt, der gleichzeitig als Leitfaden der Gespräche diente.

5. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse

Inhaltlich kann das Projekt grundsätzlich in zwei Teile unterteilt werden. Der erste Teil beschreibt eine Methode, die den Wohngebäudebestand identifiziert (Kapitel 5.1). Hierdurch soll der Ist-Zustand der Wohngebäude in Bayern bezüglich der darin verbauten Materialien beschrieben werden. Der zweite Teil des Vorhabens geht auf die dynamischen Vorgänge in diesem System ein (Kapitel 5.2). Unter Berücksichtigung von ausgewählten Einflussparametern und Entwicklungsszenarien wird eine Berechnungsmethodik entwickelt, mit der die zukünftigen Materialströme beschrieben werden können.

5.1. Ist-Zustand der verbauten Materialien

5.1.1. Methodenanalyse zur Materialerfassung des Wohngebäudebestandes

Prinzipiell kann der Materialbestand innerhalb definierter geografischer Grenzen mit Bottom-Up- und Top-Down-Methoden beschrieben werden. Mit der Top-Down Methode können Materialflüsse und lagerbezogene Aussagen mit ökonomieübergreifenden und volkswirtschaftlichen Daten bestimmt werden und es ist eine umfassende Beschreibung der wesentlichen Input- und Outputströme in einem System möglich. Allerdings können keine direkten Aussagen zu Lagerbeständen getroffen werden. Um mittels Top-Down-Methode die Lagerbestände beschreiben zu können, müssen alle Input- und Outputströme in einem definierten Zeitraum ab dem Zeitpunkt $t=0$ betrachtet und miteinander verrechnet werden. Dabei muss der Bestand zum Zeitpunkt $t=0$ jedoch bereits bekannt sein. Weiterhin nachteilig ist, dass die Differenzierung der Materialflüsse deutlichen Grenzen unterliegt. Zwar gibt es mehrere Datenquellen, wie die Statistiken zu Materialströmen aus Bauabfällen sowie die Produktionserhebungen unterschiedlicher Gewerbe, etwa dem Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden, jedoch ist eine Zuordnung eines Materials (z. B. Beton) zu einem konkreten Teilbereich, wie dem Wohngebäudebereich, nicht möglich. Weiterhin ist eine geografische Zuordnung der Stoffströme innerhalb der Grenzen Bayerns nicht gegeben. Damit kann keine Zuordnung der Stoffströme zu 3D-Gebäudemodellen erfolgen. [6], [7]

Demgegenüber werden bei der Bottom-Up-Methode Materiallager und -flüsse unter Verwendung güterbezogener Materialkennziffern hochgerechnet. Hierbei werden Einzelobjekte betrachtet, wobei güterbezogene Materialkennwerte mit den Daten zum Bestand verknüpft werden. Darauf basierend werden Hochrechnungen zu Lagerbeständen und Materialflüssen durchgeführt. Dies eröffnet die größten Freiheitsgrade bei der Beschreibung der Bestände und der Stoffflüsse. Nachteilig bei dieser Methode ist allerdings, dass es zu Erfassungslücken kommen kann. [6], [7]

Die Kombination der beiden Berechnungsansätze wird als Hybrid-Methode bezeichnet. Dabei wird der Materialbestand aus beiden Perspektiven betrachtet, was eine Identifikation der Differenzen ermöglicht. In Abbildung 1 ist beispielhaft der Material-Input im Hochbau in

Deutschland für das Jahr 2010 dargestellt. Die Ergebnisse basieren zum einen auf der Bottom-Up und zum anderen auf der Top-Down Methode. [6], [7]

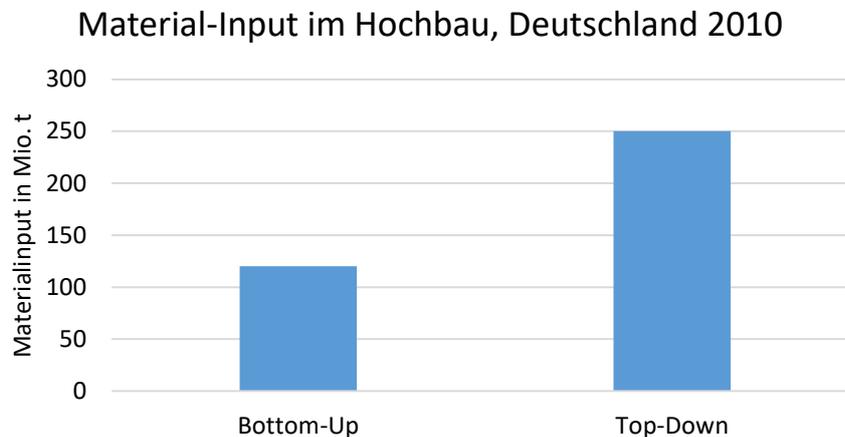


Abbildung 1: Material-Input im Hochbau in Deutschland im Jahr 2010, basierend jeweils auf den Ergebnissen der Bottom-Up und der Top-Down Methode, eigene Darstellung nach [7]

Die Differenz in Abbildung 1 begründet sich zu 97 % aus mineralischen Baumaterialien, da diese den größten Massenanteil bei den Baustoffen besitzen. Der signifikante Ergebnisunterschied begründet sich in den bereits beschriebenen Eigenschaften der Methoden. Hierbei handelt es sich um Unschärfen bei der Trennung der statistischen Daten in der Top-Down-Methode und um die Erfassungslücken des Modells in der Bottom-Up-Methode. [7]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Hinblick auf die Bestimmung der verbauten Materialien im Gebäudebestand bei gleichzeitiger Kopplung der Informationen an 3D-Gebäudemodelle die Wahl einer Bottom-Up Methode zu empfehlen ist.

Nach der Untersuchung der allgemeinen Vorgehensweise wurden im Projektverlauf konkrete Methoden zur Erfassung des Materialbestandes betrachtet. Die Recherche zeigte fünf Methoden im nationalen sowie internationalen Gebiet, die in unterschiedlichen Rahmen Anwendung fanden.

Methode nach Matthias Heinrich

In seiner Dissertation am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen an der Technischen Universität München entwickelte Matthias Heinrich ein Berechnungsmodell, das unter Berücksichtigung von geografischen und zeitlichen Gegebenheiten die stoffliche Zusammensetzung des Wohngebäudebestandes sowie die daraus resultierenden Stoffströme ermittelt. Dies erfolgt durch die Verknüpfungen von Gebäudegeometrien aus den 3D-Stadtmodellen mit bestehenden Materialkennwerten auf Gebäude-, Bauteil- und Baustoffebene. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit wurden anhand eines realen Stadtteils (München Freiham) validiert. [5]

Die Geometrien der Gebäude liefern Aussagen zu den Gebäudevolumina (Bruttorauminhalt [BRI] in m^3), Außenwandflächen sowie zu Grund- und Dachflächen (in Quadratmetern [m^2]). Die Materialkennwerte können Gebäudetypologien entnommen werden. Diese Gebäudetypologien beschreiben die Stoffintensität eines Gebäudes oder eines Bauteils anhand von Baualter und Gebäudetyp. Die Stoffintensitäten werden beispielsweise in den Einheiten kg/m^3 oder kg/m^2 angegeben. In der Forschungsarbeit wurden diese Stoffintensitäten mit den Angaben aus dem 3D-Stadtmodell verknüpft, sodass die Materialzusammensetzung des betrachteten Stadtraums ermittelt wurde. Entscheidend dabei ist, dass das geometrische Modell semantische Gebäudeinformationen wie das Baujahr und die Nutzung enthält.

PRIGG

Das Projekt „Technoökonomische Potentiale der Rückgewinnung von Rohstoffen aus dem Industrie- und Gewerbegebäude-Bestand“ der TU Darmstadt untersuchte Nichtwohngebäude in der Region Frankfurt/ Rhein-Main. Hierbei wurde zunächst eine Gebäudetypologie für Nichtwohngebäude bezüglich ihrer Nutzung erstellt. Dieser wurden flächendeckend entsprechende Gebäude aus der Region zugeordnet. Daraufhin wurden Gewerbe- und Industriegebäude hinsichtlich ihrer Materialität inventarisiert. Die Rohstofffassung erfolgte zum einen auf Basis der Unterlagen des Baubestandes und zum anderen durch Vor-Ort-Begehungen einzelner Referenzgebäude. Damit konnten die Materialkennwerte der jeweiligen Gebäude definiert und die Gebäudetypologie bestätigt werden. Darüber hinaus dienten die Daten dazu, entsprechende Baualtersklassen festzustellen. [8]

Im Wesentlichen ähnelt diese Methodik stark der Vorgehensweise von Matthias Heinrich: Gebäude Geometrien aus digitalen Modellen werden mit semantischen Informationen und Materialkennwerten so verknüpft, dass ein Rohstoffkataster erstellt werden kann. Der große Unterschied bestand darin, dass bei den Typologien nicht auf bereits existierende Informationen zugegriffen werden konnte, sondern diese auf Grund von fehlenden Daten zunächst erarbeitet werden mussten.

Rohstoffhebung der Gebäude der Stadt Wien

Im Projekt „Hochbauten als Wertstoffquelle“ des Christian Doppler Labors für Anthropogene Ressourcen an der TU Wien wurde ein Rohstoffkataster der Hochbauten der Stadt Wien erstellt. Zunächst wurde im Rahmen der Forschungsarbeit versucht über die Abbruchmaßnahmen in der Stadt Aussagen zur Materialität des Gebäudebestandes zu treffen. Hierzu wurden in Fallstudien 14 Gebäude vor ihrem Abbruch untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse der Fallstudien mit den Daten der Entsorgungsnachweise der Abbruchunternehmen zeigte jedoch so große Diskrepanzen in Bezug auf die materielle Zusammensetzung der Gebäude, dass diese Methode nicht weiterverfolgt und dafür eine neue Vorgehensweise entwickelt wurde. [9]

Das zweite Prinzip beruhte auf der Bestimmung der spezifischen Materialwerte für unterschiedliche Gebäudetypen sowie auf der städtischen Gebäudestrukturanalyse. Zur Bestimmung der Materialzusammensetzung verschiedener Gebäude wurden für jede

Gebäudekategorie spezifische Materialintensitäten (in $\text{kg/m}^3_{\text{BRI}}$) generiert. Hierfür wurden einerseits bereits erhobene Daten aus den Fallstudien verwendet und andererseits vorhandene Unterlagen wie Bestandspläne, Abbruchkonzepte und Schadstofferkundungen weiterer Abbruchobjekte sowie Lebenszyklusanalysen von Neubauten auf ihre Stofflichkeit untersucht. Insgesamt wurden für das Vorhaben Daten von mehr als 60 Gebäuden ausgewertet. [10], [9]

Die Analyse der Gebäudestruktur erfolgte auf Basis unterschiedlicher Geoinformationssystem (GIS) - Datensätze. Dabei wurde ein digitales Modell generiert, welches auf Gebäudeebene Informationen zu Gebäudevolumen, Baualtersklasse und Gebäudenutzung enthält. Daraufhin wurden Gebäudetypologien definiert, die sich in Bezug auf die Nutzung und die Baualtersklasse unterscheiden. Schließlich konnte durch die Zuordnung der spezifischen Materialkennwerte zu den jeweiligen Gebäudetypologien das Materiallager der Gebäude der Stadt Wien berechnet und die räumliche Verteilung dargestellt werden. [10], [9]

UMKAT

Im Forschungsprojekt „Das anthropogene Lager in der Steiermark. Entwicklung eines Urban-Mining-Katasters“ wurden neben dem Gebäudelager auch Netzwerke, langlebige Konsumgüter und Senken bezüglich ihrer Stoffzusammensetzung qualitativ und quantitativ untersucht. Darüber hinaus wurde das Materialkataster am Beispiel des Stadtteils Eggenberg in Graz (Österreich) angewendet und die Praxisauglichkeit überprüft. [11], [12]

Um die Stoffzusammensetzung der Gebäude in der Steiermark zu bestimmen, wurde auf eine Methode zurückgegriffen, die bereits in der Schweiz Anwendung fand. Dabei wurde die Materialzusammensetzung von fiktiven Gebäudemodellen betrachtet, die sich nach Baualtersklassen und Nutzungskategorien unterscheiden. So wurden bei Wohngebäuden insgesamt zwei Typen (Ein- und Mehrfamilienhäuser) mit jeweils vier Baualtersklassen betrachtet. Die daraus folgenden Materialkennwerte der synthetischen Gebäude wurden dem Gebäudebestand der Steiermark zugewiesen, der durch statistische Erfassungen in Österreich bekannt war. Da die Bauepochen der beiden Datensätze nicht übereinstimmten, wurden die Baualtersklassen der fiktiven Gebäudemodelle an die der statistischen Datensätze angepasst. In der Studie wurden die Materialien Kies/ Sand, Mergel/ Ton, Zement, Holz und Kupfer betrachtet. Allerdings erfolgte an dieser Stelle keine geografische Zuordnung der Materialitäten. Die Ergebnisse für den jeweiligen Gebäudetyp wurden in Tonnen (t) Material pro Gebäude angegeben. [11], [12]

Darüber hinaus fand in einem kleineren Testgebiet eine Fallstudie statt, bei der sich das Vorgehen von der oben beschriebenen Systematik unterschied. Als Testgebiet wurde der Stadtteil Eggenberg in Graz ausgesucht. Hierbei wurden Daten- und Wissenslücken im Untersuchungsgebiet durch Begehungen und Expertenbefragungen so weit wie möglich geschlossen. Insgesamt wurden bei den Begehungen 170 Wohn- und Nichtwohngebäude näher betrachtet und fehlende Informationen manuell aufgenommen. Im Gegensatz zum Vorgehen in der Steiermark wurden in Eggenberg die Wohngebäude lediglich nach Baualtersklassen und nicht nach Nutzungstypen unterschieden, wobei fünf statt vier Bauepochen definiert wurden.

Weiterhin wurde auf Gebäudekennwerte aus eigenen Berechnungen zurückgegriffen, die wiederum auf anderen Studien basieren. Es wurden die Materialien zementgebundene Baustoffe, keramische Baustoffe, mineralische Dämmstoffe, Holz, Eisen/ Stahl, Kupfer, Aluminium und PVC betrachtet. Das Zusammenführen der Daten führte zur Bestimmung des Lagers für das Untersuchungsgebiet in Tonnen pro Kubikmeter Bruttorauminhalt (t/m^3_{BRI}). Die gleichzeitige Kopplung dieser Informationen mit GIS-Gebäudemodellen erlaubte eine Verortung der Stoffe und die Visualisierung des Materiallagers in einer Karte. [11], [12]

Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Berechnungsverfahren zeigte Unterschiede bezüglich des Gebäudebestands. Die Autoren der Studie vermuten, dass mit der ersten Methode das Gebäudelager der Steiermark unterschätzt wurde. [11]

PILAS

Das Projekt PILAS der Technischen Universität Wien behandelt die Entwicklung eines Konzepts eines materiellen Gebäudepasses. Dabei beschreiben die Autoren zwei Ansätze zur Materialerfassung. Basierend auf einem Top-Down-Ansatz werden die Stoffe qualitativ und auf Grundlage des Bottom-Up-Ansatzes quantitativ erfasst. Die vorgestellte Methode ist zunächst für Neubauten konzipiert und lässt sich bei vorhandener Datengrundlage auf Bestandsgebäude übertragen. Auf der qualitativen Ebene wird das jeweilige Gebäude in Bereiche und Unterbereiche bis hin zu Bauelementen und Materialien unterteilt. Bei der quantitativen Erfassung werden den Materialpositionen geometrische Eigenschaften und Gewichtsgrößen zugeordnet sowie im Gebäude aufsummiert. [13]

Die vorgestellte Herangehensweise fokussiert sich nicht auf große Gebäudebestände, sondern auf einzelne Gebäude (insbesondere auf Neubauten). Außerdem findet hier keine direkte Kopplung mit 3D-Stadtmodellen statt. Da dies nicht den Anforderungen der hiesigen Studie entspricht, wird diese Methode nicht weiter vertieft.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Methoden zur Bestimmung des Stofflagers im Gebäudebestand weisen gewisse Parallelen auf: 3D-Gebäudemodelle liefern die Gebäudevolumina, die mit Materialkennwerten aus Gebäudetypologien über semantische Informationen der Bauwerke, wie Bauepoche und Nutzungsart, verbunden werden. Diese Vorgehensweise sollte auch bei einem Rohstoffkataster der Wohngebäude in Bayern angestrebt werden. Die Unterschiede der einzelnen Systematiken bestehen im Wesentlichen in der Wahl der Gebäudetypologien und in der Verfügbarkeit der semantischen Daten. Im Falle der Forschungsarbeit von Matthias Heinrich verfügte das 3D-Stadtmodell bereits über Informationen zu Baualtersklassen und Typen der betrachteten Gebäude. Andere Studien gelangten an diese Informationen durch örtliche Begehungen und Datenaufnahmen. Das Projekt UMKAT bediente sich der Statistiken, die in Österreich den Gebäudebestand beschreiben und die regelmäßig erhoben werden. Die erfolgreiche Umsetzung einer Rohstoffkartierung ist demnach vom Vorhandensein der benötigten Informationen

abhängig. Daher beschäftigte sich die vorliegende Studie zusätzlich mit der Datenverfügbarkeit im Freistaat Bayern.

5.1.2. Analyse der Dateninfrastruktur, Datenverfügbarkeit und Datenbeschaffung

Basierend auf den Ergebnissen von Arbeitspaket 1 wurde untersucht, welche Daten in welcher Form für eine Rohstoffkartierung in Bayern verfügbar sind und wo Datenlücken bestehen. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, besteht die Datengrundlage einer materiellen Bestandsaufnahme der Wohngebäude aus 3D-Gebäudemodellen, Materialkennwerten, Gebäudetypologien und semantischen Daten wie Baualtersklasse und Gebäudetyp.

3D-Gebäudemodelle

Digitale Gebäudemodelle stellen existierende oder geplante Gebäude dreidimensional und digital dar und können mittels verschiedener Softwarelösungen visualisiert werden. Dabei können einzelne Gebäude, aber auch ganze Stadtquartiere abgebildet werden. Dies geschieht in unterschiedlichen Detaillierungsstufen, auch „Level of Detail“ (LoD) genannt. LoD1, auch als Klötzchenmodell bezeichnet, gibt Gebäude mit Flachdächern wieder. LoD2 visualisiert einen höheren Detaillierungsgrad, bei dem die Dachformen standardisiert dargestellt werden. Die Eigenschaften, die ein Gebäude beschreiben und die im Modell hinterlegt sind, heißen Attribute.

Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) verfügt flächendeckend über 3D-Stadtmodelle im LoD2-Detaillierungsgrad für den gesamten Freistaat Bayern. Damit besteht das Modell aus insgesamt ca. 3.000.000 Hauptgebäuden. Jedes einzelne Gebäudemodell enthält 27 Attribute. Dazu gehören u. a. die Lagebezeichnung, die Anzahl der oberirdischen Geschosse, die Dachform, die Funktion sowie der Gemeindegeschlüssel. Bei der Funktion werden unterschiedliche Kategorien differenziert, wie etwa Wohngebäude, Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe, Parkhaus und weitere. Der Gemeindegeschlüssel stellt eine 8-stellige Zahl dar, mit der ein Gebäude einer Gemeinde eindeutig zugeordnet werden kann. Das Attribut „Baujahr“ ist nicht implementiert. Damit fehlt den 3D-Gebäudemodellen eine wichtige Komponente zur Beschreibung des Baubestandes. [14]

Wohngebäudetypologien

Wohngebäudetypologien dienen dem Zweck, den heterogenen Bestand an Bauwerken durch bestimmte Aspekte zu kategorisieren und somit zu gruppieren. Die meisten Wohngebäudetypologien bedienen sich beim Clustern der Aspekte Baujahr bzw. Baualtersklasse und Gebäudetyp. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass die Gebäude, die ein und derselben Kategorie angehören (z. B. Einfamilienhäuser mit Baujahr 1950), die gleichen Charakteristika (z. B. in Bezug auf ihre Materialzusammensetzung) aufweisen. Das Baualter ist daher wichtig, da jede Bauepoche typische Bauteilflächen und allgemein übliche Konstruktionsweisen aufweist. Die Zeitabschnitte werden durch die Verfügbarkeit von Baustoffen, historische Ereignisse sowie gesetzliche Bauvorschriften bestimmt. Es sei darauf hingewiesen, dass ein Gebäude aus einer Gebäudetypologie keineswegs vollkommen mit einem realen Gebäude übereinstimmt, sondern dass mit gewissen Abweichungen zu rechnen ist.

Im deutschen Raum existieren mehrere Wohngebäudetypologien. Die deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) definiert in einer Matrix vier Basistypen (EFH, RH, MFH, GMH) und 12 Baualtersklassen (A – L) sowie einige zusätzliche Sonderfälle [15]. Die Studie diente primär der Bestimmung des Energiebedarfs und der energetischen Optimierung typischer Wohngebäude. Zwar werden in den jeweiligen Gebäudedatenblättern die Baukonstruktion und die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der einzelnen Bauteile beschrieben, die Angaben zur Stoffintensität fehlen allerdings. Gleiches findet sich bei der Anlagentechnik, wo lediglich eine Beschreibung der Wärmeversorgung stattfindet. Ein weiterer Nachteil dieser Gebäudetypologie ist, dass diese keine regionalen Unterschiede und somit keine bayernweit typischen Aufbauten betrachtet. Aus diesen Gründen wird diese Klassifizierung des Gebäudebestandes zur Durchführung eines Rohstoffkatasters für nicht geeignet befunden.

Ebenfalls vom Institut Wohnen und Umwelt wurde bereits im Jahr 2006 eine Studie herausgebracht, die die Wohngebäude in Bayern einteilt [16]. Die Dokumentation enthält insgesamt 11 Hausdatenblätter, die sich regional auf den Freistaat beziehen. Ähnlich wie bei der Studie aus dem Jahr 2015 werden die Gebäude nach Typ und Baualter unterschieden. Zwar ist der Aufbau der einzelnen Bauteile in dieser Studie differenzierter vorzufinden (z. B. 24 cm Vollziegeldicke bei der Außenwand), jedoch sind auch hier keine Materialkennwerte aufgeführt. Ein weiteres Defizit ist, dass die Typologien lediglich die Baujahre 1949 – 1978 abdecken, sodass hier eine große zeitliche Lücke besteht.

Das Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) führte zwei Studien zur Einteilung des Wohngebäudebestandes durch. Im Jahr 2002 beschäftigte sich das Projekt mit den neuen Bundesländern [17], im Jahr 2011 wurde die Typologie auf Westdeutschland ausgebaut [18]. Im zweiten Teil wurden synthetische Gebäudetypen erarbeitet, die sich anteilig aus Bestandsgebäuden zusammensetzen. Weiterhin veröffentlicht das IÖR die aktuellsten Daten in der online Datenbank <http://ioer-bdat.de/bauwerksdaten/wohngebaeude/> [19]. Sowohl in [18] als auch in [19] unterscheiden die Autoren Ein-/ Zwei- und Mehrfamilienhäuser nach folgenden Baualtersklassen in Ost- und Westdeutschland, wobei für dieses Projekt insbesondere die Datenblätter der alten Bundesländer von Relevanz sind:

- ➔ MFH bis 1918 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ MFH 1919-1948 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ MFH 1949-1978 für Ostdeutschland
- ➔ MFH 1949-1978 für Westdeutschland
- ➔ MFH 1979-1990 für Ostdeutschland
- ➔ MFH 1979-1990 für Westdeutschland
- ➔ MFH 1991-2000 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ E/ZFH bis 2000 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ MFH 2001-2010 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ E/ZFH 2001-2010 für Ost- und Westdeutschland

Darüber hinaus wurden in [18] zwei zukünftige Gebäudetypen generiert, die im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet werden.

- ➔ MFH und E/ZFH 2011-2030 für Ost- und Westdeutschland
- ➔ MFH und E/ZFH 2031-2050 für Ost- und Westdeutschland

Ein entscheidender Vorteil der IÖR-Typologien sind die Stoffkennwerte, die für jedes synthetische Gebäude hinterlegt sind. Zu jedem Gebäudetyp werden in tabellarischer Form die verbauten Baustoffgruppen in Tonnen und Kubikmetern pro Gebäude (in t/Gebäude und m³/Gebäude) angegeben. Mit der Angabe zum Bruttorauminhalt in Kubikmetern lassen sich spezifische Stoffintensitäten (in t/m³_{BRI} oder m³/m³_{BRI}) ableiten.

Die 2011 veröffentlichte Studie und die Online-Datenbank bilden unterschiedliche Baustoffgruppen ab (s. Tabelle 1). Dies begründet sich daher, dass das IÖR über eine interne Datenbank verfügt (öffentlich nicht zugänglich), in der die Materialien in einer feineren Granularität aufgelistet sind. Je nach Fragestellung werden unterschiedliche Materialgruppen gebildet und veröffentlicht. So waren bei der Studie von 2011 energetische Fragen von Bedeutung, bei der online Datenbank stehen Stoffintensitäten von Gebäuden im Vordergrund. Demnach ändert sich die Summe der verbauten Stoffe in einem Wohngebäude je nach betrachteter Quelle nicht, sondern nur die Einteilung der Stoffgruppen. [20]

Tabelle 1: Materialgruppen der Wohngebäudetypologie des IÖR, eigene Darstellung nach [18] und [19].

Materialgruppe nach Studie 2011, [18],	Materialgruppen nach online Datenbank, [19]
Putze, Estriche, Mörtel	Beton
Betone	Ziegel
Mauersteine	Sonst. Mineralisches
Bauplatten	Eisenmetalle
Holz, Holzwerkstoffe	Holz
Wärmedämmstoffe	Sonst. Nachwachsendes
Dachdeckungen	Kunststoffe
Beläge, Dichtungsbahnen	Bitumenhaltiges
Sonst. Stoffe, Schüttungen	Asbest
Metalle	Nichteisenmetalle

Insgesamt bietet die Wohngebäudetypologie des IÖR eine gute Datengrundlage zur Umsetzung eines Rohstoffkatasters. Dabei empfiehlt es sich insbesondere auf die online Datenbank zuzugreifen. Zum einen wird diese stetig aktualisiert und erweitert, zum anderen sind die Baumaterialgruppen nach der Frage der Stoffintensitäten in Gebäuden zusammengefasst. Die Zuordnung der Baumaterialien den Baumaterialgruppen kann der online Datenbank entnommen werden und ist dem Anhang A beigelegt.

Als nachteilig ist zu erwähnen, dass es durch die Angabe der Stoffintensitäten in ganzen Zahlen zu Rundungsfehlern kommt. Bei den Baugruppen, deren Stoffintensität mit einer Null gekennzeichnet ist, z.B. Asbest, entsteht der Eindruck, dass dieses Material in den Gebäuden nicht vorhanden ist. Tatsächlich sind diese Baustoffe verbaut, werden jedoch durch die geringen

Werte in den Veröffentlichungen nicht publiziert. Die Datenbank wird aber immer weiter ausgebaut und aktualisiert, sodass in Zukunft mit differenzierten Werten zu rechnen ist [20].

Semantische Gebäudedaten

Zu semantischen Gebäudedaten zählen u. a. die Nutzung sowie das Baujahr der Gebäude. Wie im Abschnitt *3D-Gebäudemodelle* bereits beschrieben, enthält das digitale Modell des Freistaates Bayern das Attribut Nutzung. Das Attribut Baujahr fehlt allerdings. Daher wurde im weiteren Verlauf untersucht, wo diese Information hinterlegt ist und in welcher Form. Die Recherche ergab, dass das Baujahr zwar in unterschiedlichen Quellen zu finden ist, jedoch wird diese Angabe weder zentral gesammelt noch verwaltet. Die vielversprechendste Quellen stellen die Bebauungspläne dar (vgl. Abbildung 2). Diese werden von den jeweiligen Gemeinden geführt, wobei ein Bebauungsplan i. d. R. nur einen Teil des Gemeindegebiets umfasst [21].

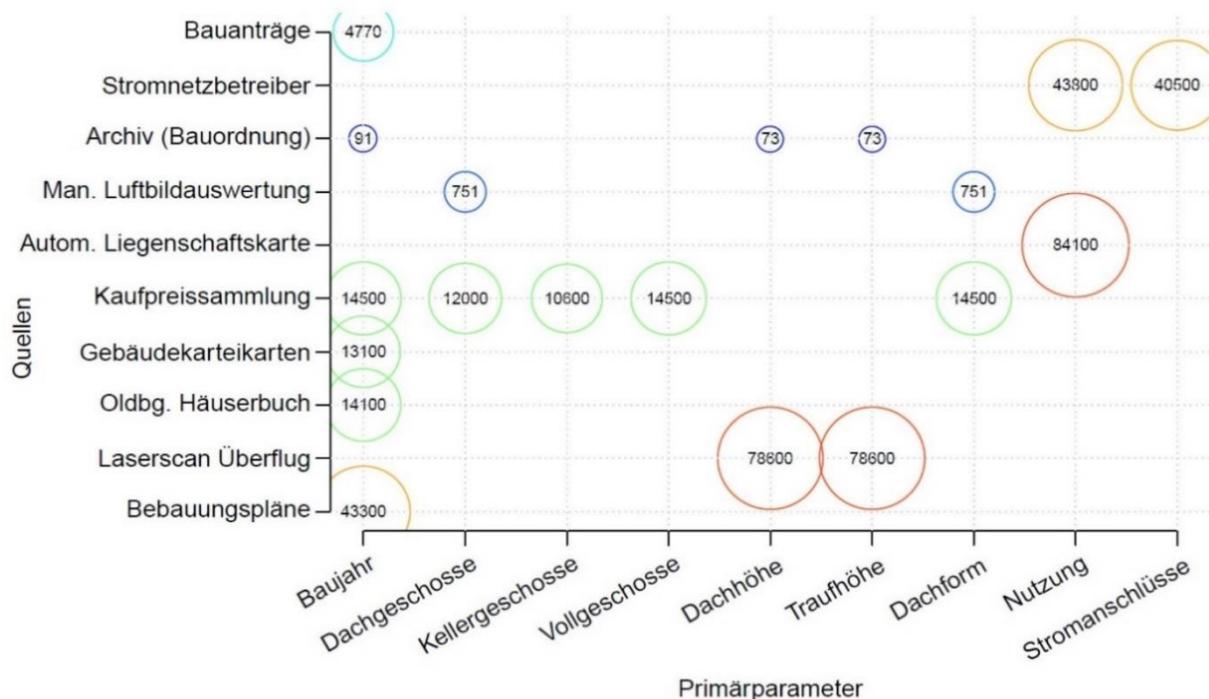


Abbildung 2: Statistik der Primärparameterverwaltung für Parameter und Datenquellen; die Farben der Kreise verdeutlichen die Menge der Datensätze von Blau (sehr wenige) bis Rot (ca. 80.000). [21]

Leider liegen die Bebauungspläne teils analog in Papierform vor. Dies erschwert die Sammlung der Daten, da der Vorgang sehr zeitintensiv ist. Zur Verdeutlichung: für eine händische Auswertung von 100 Gebäuden werden 22 Personenstunden benötigt [21].

Eine Möglichkeit, die Baujahre in digitaler Form zu ermitteln, stellen georeferenzierte Angaben zu Gebäudetypen dar. Diese Gebäudedateien stellen das jeweilige Bauwerk als Punkt auf einer Karte dar, dem eine Baualtersklasse zugeordnet ist. Der GeodatenService der Stadt München verfügt über eine solche Gebäudedatei, damit ist die Landeshauptstadt jedoch eine Ausnahme. Im Rahmen des Projekts wurde eine Umfrage unter 10 kleinsten, 10 mittleren und 10 größten

(insgesamt 30) Kommunen Bayerns durchgeführt, in der sie nach dem Bestand der Gebäudedateien gefragt wurden. Keine der befragten Kommunen konnte vollständige Gebäudedateien vorweisen. Lediglich zwei Kommunen machten die Aussage, dass ihnen georeferenzierte Baujahre in digitaler Form lückenhaft vorliegen (s. Abbildung 3).



Abbildung 3: Verfügbarkeit der georeferenzierten Baujahre von Gebäuden der befragten Kommunen, eigene Darstellung

Eine Möglichkeit, mit diesen Datenlücken umzugehen, ist das Heranziehen von Statistiken. Hier stehen mehrere Studien zur Verfügung. Die bereits erwähnte deutsche Wohngebäudetypologie des IWU beschreibt die Häufigkeitsverteilung der hier definierten Basistypen im deutschen Wohngebäudebestand [15]. Die Studie „Energetische Gebäudesanierung in Bayern“ zeigt die Verteilung der Wohnfläche in Bayern in Abhängigkeit der Baualtersklasse und des Gebäudetyps (MFH, ZFH, EFH) [22]. Eine sehr umfangreiche Statistik stellt der *Zensus 2011* dar.

Der Zensus 2011 ist eine Bevölkerungs-, Wohnungs- und Gebäudezählung zum Stichtag 9. Mai 2011. Die nächste Zählung findet im Jahr 2021 statt, wobei die Daten voraussichtlich im Jahr 2022 veröffentlicht werden. Die statistischen Daten werden zum einen beim Bayerischen Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung bereitgestellt. Zum anderen können diese auf der eigenen Homepage (<https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online>) abgerufen werden. Hierbei bietet die Statistik viele Möglichkeiten der Informationsausgabe und der/die Nutzer:in ist in der Lage, Ergebnisse nach Bedarf zu konfigurieren. So können statistische Werte für ganz Deutschland, über einzelne Bundesländer bis hin zu einzelnen Gemeinden abgerufen werden. Ebenfalls ist es möglich, interessierende Merkmale auszuwählen und die Hierarchie der Ergebnisdarstellung festzulegen, z. B.:

- Art des Gebäudes (Wohngebäude)
 - davon vor 1919 (Baujahr)
 - davon freistehendes Haus (Bauweise)
 - davon 1 Wohnung (Wohnungen im Gebäude)

Die Statistik differenziert zwischen vier oder zehn Baualtersklassen. Bei den Bauweisen werden vier Typen unterschieden: freistehendes Haus, Doppelhaushälfte, gereihtes Haus, anderer Gebäudetyp. Bei der Anzahl der Wohnungen im Gebäude kann zwischen einer, zwei oder drei

und mehr Wohnungen getrennt werden. Damit ermöglicht der Zensus viele Freiheitsgrade, um den Wohngebäudebestand durch unterschiedliche Merkmale zu beschreiben.

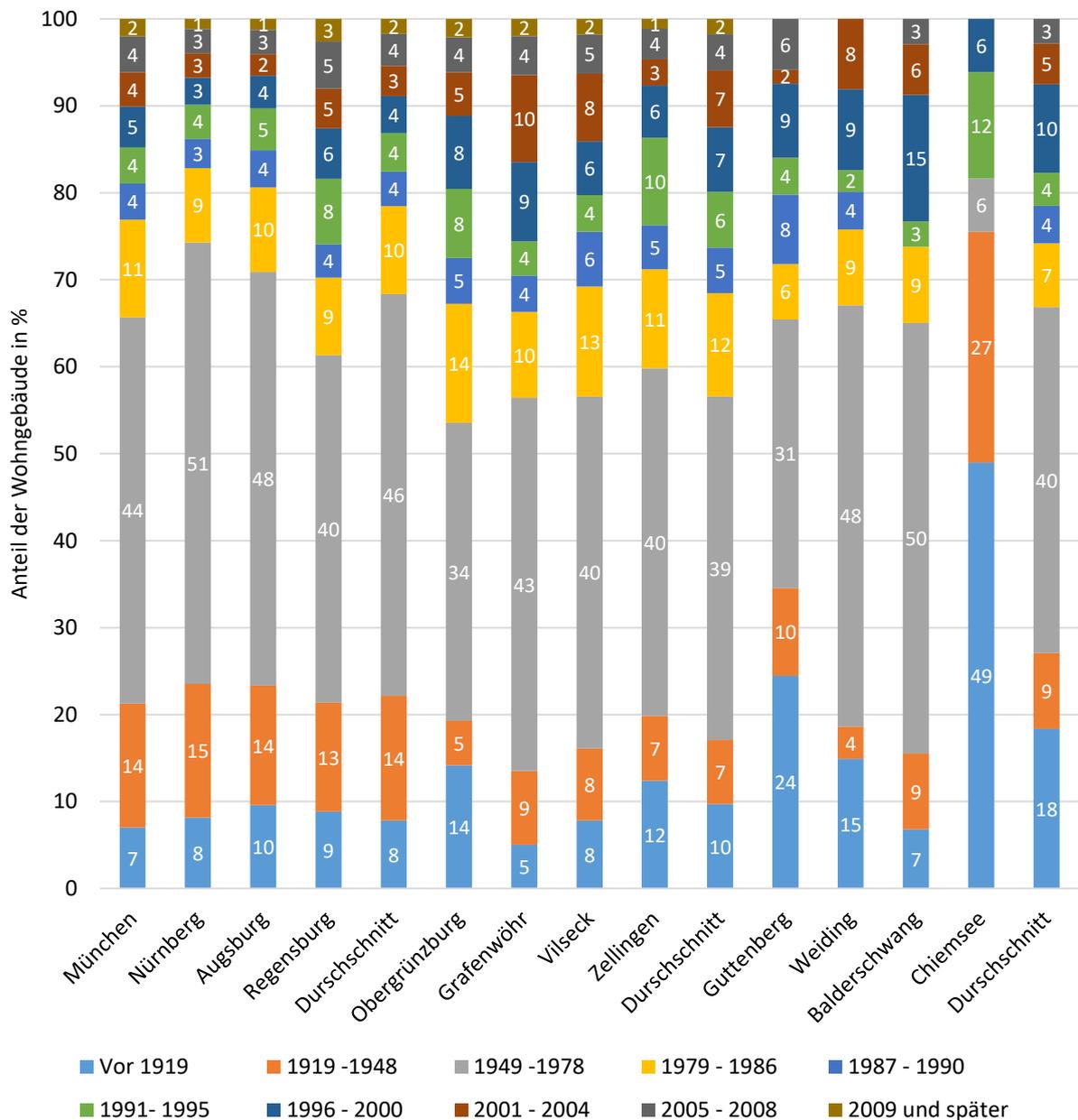


Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Baualtersklassen im Wohngebäudebestand für die vier größten, vier mittlere, die vier kleinsten Kommunen Bayerns sowie der jeweilige Durchschnitt, eigene Darstellung nach [23]

Die Kopplung der statistischen Verteilungen des Wohngebäudebestandes mit den 3D-Gebäudemodellen der einzelnen Gemeinden ist über den bereits erwähnten Gemeindegeschlüssel möglich, der in der Statistik implementiert ist. An dieser Stelle stellt sich die Frage, wie detailliert die Daten der Statistik ausgewertet werden sollten. Im Rahmen der Studie wurden die Verteilung der unterschiedlichen Baualtersklassen im Wohngebäudebestand für die vier größten, vier mittlere, die vier kleinsten Kommunen Bayerns sowie der jeweilige Durchschnitt untersucht. Die

Ergebnisse sind in Abbildung 4 abgebildet. Es zeigt sich, dass die Gebäudeverteilung der einzelnen Bauepochen in etwa gleich ausfällt. Nur Chiemsee, die kleinste Kommune Bayerns, zeigt größere Abweichungen. Allerdings ist die Tragweite dieser Abweichung zu hinterfragen, da sie keinen merklichen Einfluss nimmt. Weiterhin wird ersichtlich, dass die die Gebäude der Nachkriegszeit (1949 – 1978) den Wohngebäudebestand deutlich dominieren.

Zusammenfassung

Bayern verfügt über flächendeckende 3D-Gebäudemodelle. In diesen ist die Nutzung des Gebäudes (Wohngebäude) hinterlegt. Das Baujahr als Verbindungskomponente zwischen georeferenzierten Gebäudevolumina und stofflichen Kennwerten unterschiedlicher Gebäudetypologien ist nicht implementiert. Als Wohngebäudetypologie bildet die Online-Datenbank des IÖR eine relativ solide Basis. Die Datenlücken, die durch die Abwesenheit von digital erfassten Baujahren realer Gebäude verursacht werden, lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt durch die Zensus Statistik schließen.

5.1.3. Methodik zur Bestimmung des Materiallagers der Wohngebäude in Bayern

Bei der Durchführung der Studie wurde deutlich, dass eine georeferenzierte Rohstoffkartierung der Wohngebäude in Bayern aktuell nicht umsetzbar ist. Dies ist auf die Datenlücken im bayerischen 3D-Gebäudemodell und insbesondere auf das Fehlen digital verfügbarer Baujahre der Gebäude zurückzuführen. Dennoch kann mit den verfügbaren Daten mit Hilfe eines Bottom-Up-Ansatzes das Materiallager der Wohngebäude im gesamten Freistaat annähernd bestimmt werden. Hierzu wird die Anzahl der Bauwerke in Bayern aus der statistischen Verteilung der Wohngebäude nach dem Zensus 2011 mit den entsprechenden Stoffintensitäten ($t_{\text{Material}}/\text{Gebäude}$) der online Datenbank der Wohngebäudetypologie des IÖR verknüpft (s. Abbildung 5). Somit kann für alle Gebäude einer Typologie die Menge an verbauten Materialien bestimmt werden.

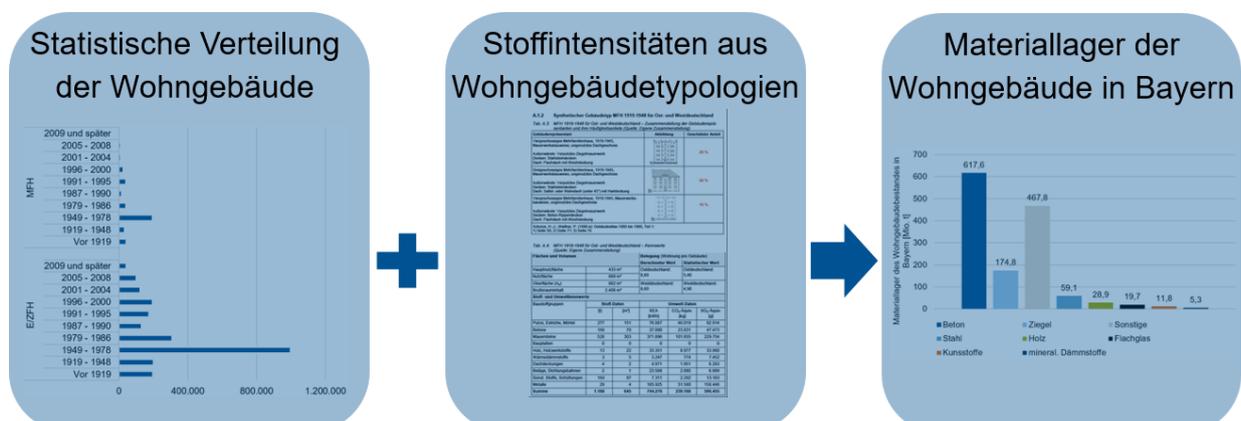


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Methodik zur Bestimmung des Materiallagers der Wohngebäude in Bayern, eigene Darstellung

Das Aufsummieren der Teilergebnisse liefert die gesamte Menge des anthropogenen Lagers im bayerischen Wohngebäudebestand. Abbildung 6 zeigt das Materialdepot der Wohngebäude in Bayern, die bis zum Jahr 2011 erstellt wurden. Die Gesamtmenge beläuft sich auf etwa 1.305 Mio. Tonnen verbautes Material. Hier fallen insbesondere die Baustoffgruppen *Beton* und *sonstiges Mineralisches* mit jeweils über 500 Mio. Tonnen auf. Somit haben die beiden Baustoffgruppen einen Anteil von etwa 79 % am gesamten Materialaufkommen. Die Gruppen *Asbest* und *Nichteisenmetalle* werden nicht aufgeführt, da sich die Werte durch die Angaben in der Gebäudetypologie des IÖR zu Null ergeben.

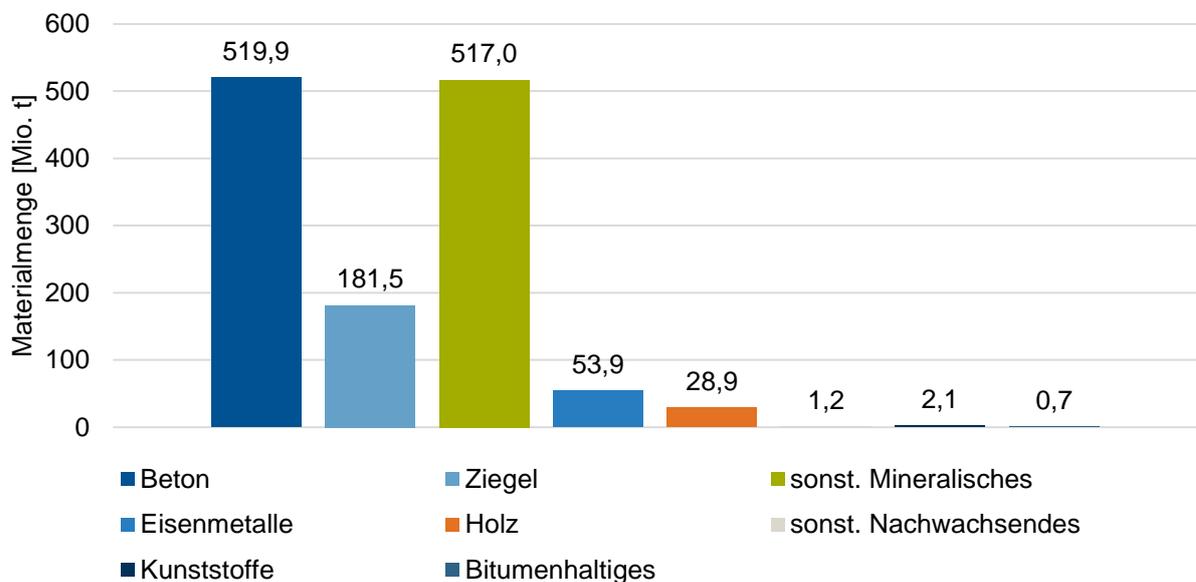


Abbildung 6: Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen, eigene Darstellung, nach [23] und [19]

Analog lässt sich diese Methodik auch auf einzelne Kommunen anwenden. Dazu wird die Bauwerksanzahl in der Kommune aus der statistischen Verteilung der Wohngebäude nach dem Zensus 2011 mit den entsprechenden Stoffintensitäten ($t_{\text{Material}}/\text{Gebäude}$) der Online-Datenbank der Wohngebäudetypologie des IÖR verknüpft und aufsummiert. Für die Landeshauptstadt München ergibt sich ein Materiallager von etwa 97 Mio. Tonnen, wie in Abbildung 7 dargestellt. Auch hier wird deutlich, dass die mineralischen Baustoffe andere Baustoffgruppen massenbezogen signifikant übersteigen.

Zwar handelt es sich hierbei nicht um georeferenzierte Ergebnisse auf Gebäudeebene, dennoch kann auf diese Weise das Stofflager geografisch eingegrenzt werden. Insbesondere für mineralische Materialien, die regional gehandelt und transportiert werden, ist dieses Wissen von besonderer Bedeutung [5]. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Berechnungen stark von der Qualität der statistischen Daten sowie der Gebäudetypologien abhängen.

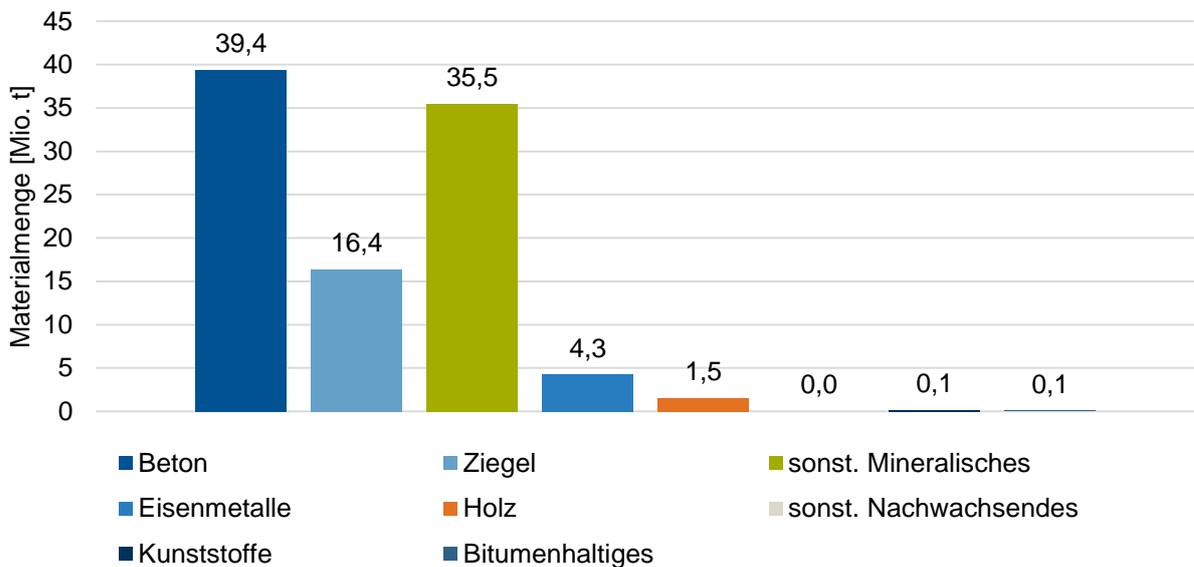


Abbildung 7: Materiallager des Wohngebäudebestandes in München in Mio. Tonnen, eigene Darstellung nach [23] und [19]

5.1.4. Validierung der entwickelten Methode

Um die bestimmten Materialmengen und damit die Berechnungsmethode zu validieren, wurden die Ergebnisse des Materiallagers des bayerischen Wohngebäudebestandes mit den Angaben zwei weiterer Studien verglichen. Die Gegenüberstellung ist in Abbildung 8 dargestellt.

In der ersten Vergleichsstudie wird der Materialverbrauch pro Person im Gebäude und Infrastruktursektor in Deutschland aufgezeigt [24]. Die Autoren gehen davon aus, dass pro Kopf im Wohngebäudebereich 105,4 Tonnen an Material verbaut sind [24]. Bei einer Bevölkerungszahl von etwa 13 Mio. Einwohnern in Bayern [25] ergibt dies ein Stoffdepot von etwa 1.385 Mio. Tonnen.

Bei der zweiten Vergleichsstudie handelt es sich um eine Veröffentlichung der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft [26]. Hier geben die Autoren an, dass das theoretische Rohstoffpotenzial im Wohngebäudebestand Bayerns bei über 1.500 Mio. Tonnen liegt.

Somit liegen die Ergebnisse zum verbauten Stoffdepot der Wohngebäude in Bayern, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt wurden, in der gleichen Größenordnung wie die Vergleichsstudien. Zwar besteht zwischen den Werten eine Differenz von maximal 195 Mio. Tonnen an Material. Dies sind jedoch Abweichungen, mit denen auf Grund der momentan unsicheren Datenlage gerechnet werden muss.

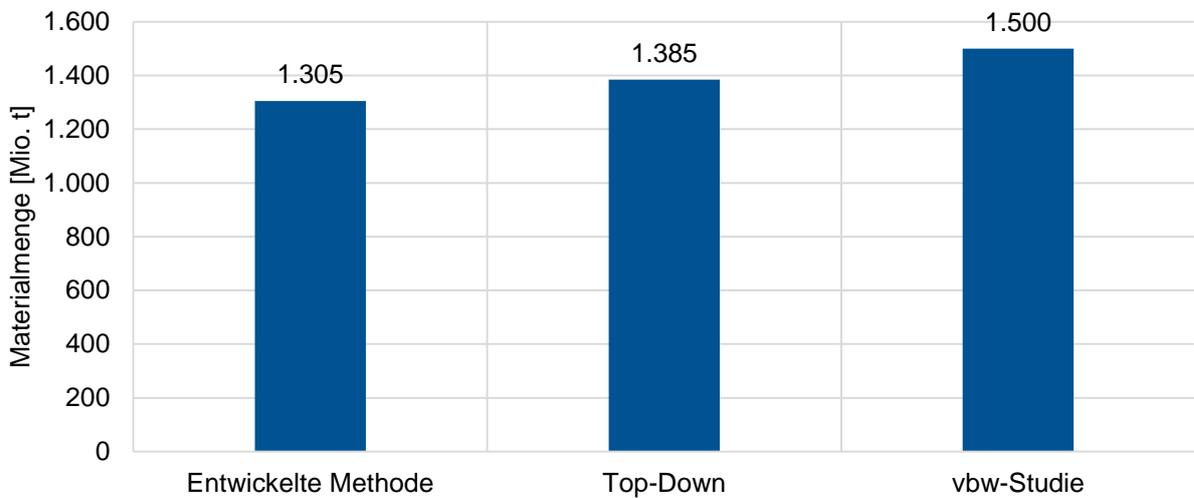


Abbildung 8: Vergleich verschiedener Studien zum Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen, eigene Darstellung nach [24] und [26]

Darüber hinaus veröffentlichten die Autoren in [24] Kennwerte zum Materialverbrauch unterschiedlicher Baustoffgruppen. Die Hochrechnungen für Bayern können Abbildung 9 entnommen werden. In [24] findet eine andere Einteilung der Stoffgruppen statt, als dies im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Damit sind die Werte nur zum Teil miteinander vergleichbar. Dennoch wird auch hieraus die große Menge an mineralischen Baustoffen, wie z.B. Beton, ersichtlich.

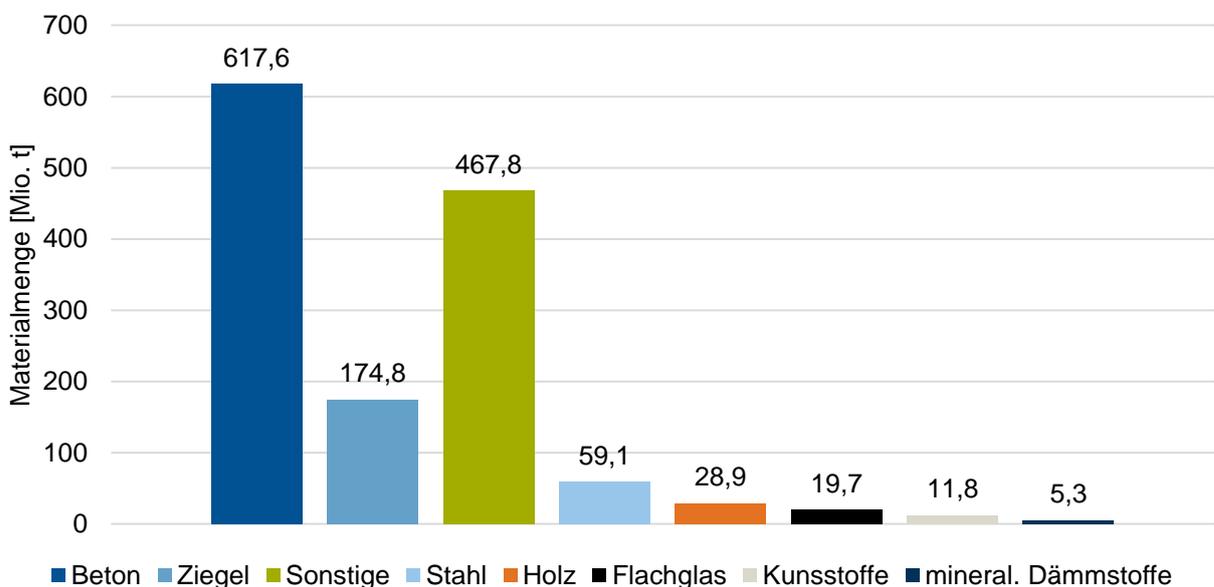


Abbildung 9: Materiallager des Wohngebäudebestandes in Bayern in Mio. Tonnen nach der Personenbezogenen Methode, eigene Darstellung nach [24]

5.1.5. Graue Emissionen (CO₂-Gehalt) des Materiallagers der bayerischen Wohngebäude

Bisher lag der Fokus energetischer Betrachtungen im Gebäudesektor insbesondere auf der Nutzungsphase. Jedoch ist der Verbrauch der s. g. grauen Energie, die bei der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung des Gebäudes und der darin verbauten Materialien verbraucht wird, nicht zu vernachlässigen. Denn um die tatsächlichen Umweltwirkungen des Bauwesens bestimmen zu können, muss der gesamte Lebenszyklus der Bauwerke betrachtet werden. Die aus der grauen Energie resultierenden Treibhausgasemissionen werden als graue Emissionen bezeichnet. Die Umweltwirkung wird in der Einheit kg CO₂-Äquivalente angegeben. Damit wird nicht nur Kohlenstoffdioxid, sondern auch andere klimawirksame Gase, wie Methan, berücksichtigt [27].

Abbildung 10 zeigt die grauen Emissionen des bayerischen Stofflagers der Wohngebäude, die durch die Herstellung der Materialien verursacht wurden. Die Berechnungen basieren auf der IÖR Studie aus dem Jahr 2011. Die Studie enthält zusätzlich zu den bereits bekannten Stoffintensitäten auch Kennwerte zum Treibhausgaspotenzial der in [18] vorgestellter Baustoffgruppen [18]. Nach Hochrechnungen enthält der bayerische Wohngebäudebestand etwa 345 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente an grauen Emissionen aus der Materialherstellung. Zum Vergleich: im Jahr 2014 verursachte der Wohngebäudebereich in ganz Deutschland bei der Nutzung und beim Betrieb direkte Treibhausgasemissionen in einer Höhe von 84 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [28]. Anteilig für Bayern bedeutet dies einen Ausstoß von etwa 13 Mio. Tonnen an CO₂-Äquivalenten in der Nutzungsphase der Wohngebäude im selbigen Jahr. Hier fallen insbesondere die Metalle stark ins Gewicht, obwohl diese mengenmäßig mit 53,9 Mio. Tonnen relativ gering ausfallen (vgl. Abbildung 6).

Insgesamt 345 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente

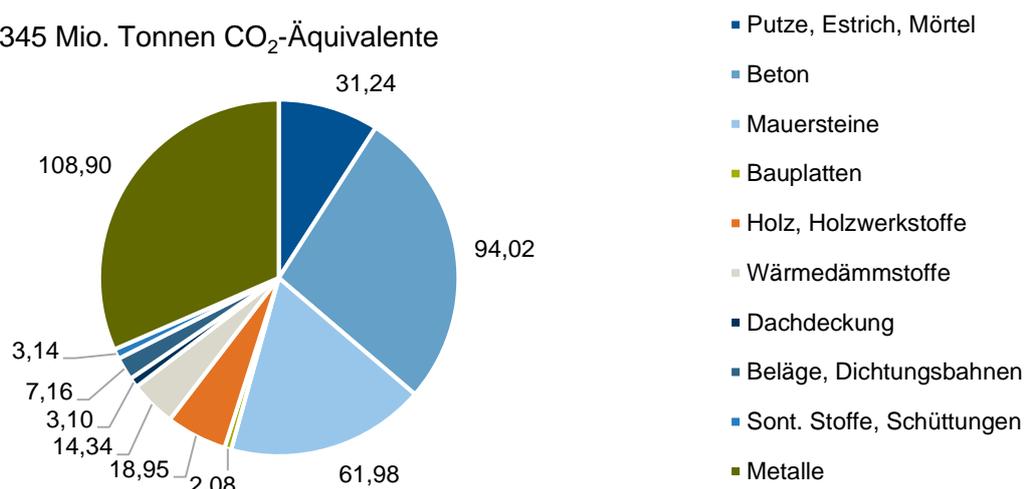


Abbildung 10: Graue Emissionen verschiedener Baustoffgruppen des bayerischen Wohngebäudebestandes in Tonnen CO₂-Äquivalente aus der Herstellungsphase der Materialien, eigene Darstellung nach [23] und [18]

Aus dieser Betrachtung wird die Notwendigkeit zur Schließung von Materialkreisläufen deutlich.

5.2. Zukünftige Materialströme

Der zweite Teil des Forschungsvorhabens beschäftigte sich mit den dynamischen Prozessen, die das Stofflager der Wohngebäude beeinflussen. Zunächst wurde untersucht, welche Faktoren Einfluss auf die zukünftigen Materialströme haben. Darauf aufbauend wurde eine Methodik entwickelt, um die zukünftigen Stoffströme zu beschreiben und zu quantifizieren.

5.2.1. Bestimmung relevanter Einflussfaktoren auf die zukünftigen Materialströme und Definition der Entwicklungsszenarien

Das in den Gebäuden verbaute Rohstoffdepot verändert sich ständig. Die Prozesse, die dazu führen sind z.B. Abriss bestehender und Errichtung neuer Bauten. Auch Sanierungs- und Umbaumaßnahmen führen zu einer Veränderung der stofflichen Zusammensetzung des anthropogenen Lagers. Die Faktoren, die diese Zugangs- und Abgangsprozesse beeinflussen, sind sowohl technischen als auch sozialen Ursprungs. Mögliche Einflussfaktoren sind zeitliche Stoffverfügbarkeiten, durchschnittliche Gebäudelebensdauern, Entwicklungen des Wohnflächenbedarfs, Wirtschaftswachstum oder der demografische Wandel [18]. Im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Baumaterialien in der Zukunft spielt zudem das Thema Recycling (Recyclingquoten, -technologien, -fähigkeit der Baustoffe) eine große Rolle.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei wesentliche Einflussfaktoren herausgearbeitet. Ziel dabei war es, Einflussfaktoren und Entwicklungsszenarien des anthropogenen Lagers so zu beschreiben, dass sie als Grundlage für Hochrechnungen dienen können. Anschließend wurde eine Berechnungsmethodik entwickelt, die verschiedene Einflussfaktoren und Entwicklungsszenarien dynamisch so miteinander verknüpft, dass Untersuchungen verschiedener Materialstromszenarien ermöglicht werden. Die Wahl dieser Faktoren erfolgte durch Literaturrecherchen sowie durch Befragung von Praxisexperten und wird im Weiteren näher beschrieben.

Lebensdauer von Wohngebäuden

Primär werden die Stoffströme von der Lebensdauer der Wohngebäude beeinflusst. Üblicherweise folgt nach dem Erreichen der erwarteten Lebensdauer der Abbruch dieser Bauwerke. Beim Gebäudeabriss wird das gesamte Stoffdepot und damit die in diesem Gebäude maximal verfügbare Menge an verbauten Materialien frei. Daher hat dieser Einflussfaktor einen besonders großen Hebel auf die anfallenden Stoffströme.

Die durchschnittliche Lebensdauer von Gebäuden hängt von unterschiedlichen Faktoren, wie der Qualität der Ausführung oder der eingesetzten Materialien, ab. Ferner nehmen die Bauwerksbeanspruchung, Umwelteinflüsse (z. B. Witterung), aber auch Wartung und Pflege des Gebäudes Einfluss. [26]

Zur Bemessung der zu erwartenden Lebensdauer existieren verschiedene Methoden wie Wahrscheinlichkeitsmodelle und anwendungsorientierte Näherungsmethoden. Die Verfahren,

denen Wahrscheinlichkeitstheorien zu Grunde liegen, stellen den Alterungsvorgang zwar sehr genau dar, sind allerdings zeit- und kostenintensiv. Anwendungsorientierte Näherungsmethoden arbeiten mit Annahmen. Hierbei werden Kennwerte durch die Praxis aus der Immobilienwirtschaft, wissenschaftliche Studien oder Herstellerangaben gebildet. Jedoch kann es teilweise zu hohen Abweichungen kommen. [29]

In der Literatur finden sich unterschiedliche Kennwerte zum erwarteten Alter von Wohngebäuden. Diese liegen in einer Spanne zwischen 60 und 100 Jahren [5], [30], [31]. Bei Nichtwohngebäuden werden mit 50 Jahren kürzere Lebensdauern als bei Wohngebäuden angesetzt [30]. Weiterhin gibt es Überlegungen, dass das Alter der Wohngebäude von ihrem Typ (Einfamilien- oder Mehrfamilienhaus [MFH]) sowie von ihrer Baualtersklasse beeinflusst wird [32].

Darüber hinaus ist zwischen der Lebensdauer eines Gebäudes und der Nutzungsdauer seiner Bauteile zu unterscheiden. Zwar entspricht das Alter der tragenden Bauteile (wie Baukonstruktion und Gründung) dem eines Gebäudes, jedoch fällt das Alter einiger Bauelemente (wie Fenster, Putze und Anlagentechnik) deutlich geringer aus. Bei der Verglasung der Außenfenster wird beispielsweise von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 30 Jahren [33] ausgegangen. Damit kommt es zum Austausch solcher Komponenten im Verlauf der Gebäudenutzung. Diese Austauschzyklen, die im Zuge von Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen umgesetzt werden, tragen wiederum dazu bei, dass Stoffströme frei werden. Allerdings handelt es sich massebezogen um deutlich geringere Mengen, da die gewichtsintensiven Bauteile (Baukonstruktion und Gründung) erst mit dem Gebäudeabriss freigesetzt werden. Daher konzentriert sich diese Studie auf Abbruchmaßnahmen am Lebensende des Gebäudes, die Sanierungs- und Instandhaltungstätigkeiten werden nicht weiter betrachtet.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden zwei Szenarien für die durchschnittliche Lebenserwartung der bayerischen Wohngebäude definiert:

- Szenario 1: die erwartete Lebensdauer beträgt 80 Jahre
- Szenario 2: die erwartete Lebensdauer beträgt 100 Jahre

Kapitel 5.2.3 zeigt eine erweiterte Methodik, die auf Grundlage dieser Annahmen ein Stoffstrommodell zur Beschreibung der anfallenden Materialien bildet.

Recyclingfähigkeit

Der zweite Faktor, Recyclingfähigkeit, wurde durch Expertenbefragungen festgelegt, denn die Praxiserkenntnisse sollten ebenfalls bei der Wahl der Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Die Interviews fanden mit Fachleuten aus drei Unternehmen statt, die ihren Standort in Bayern haben. Zwei der Unternehmen beschäftigen sich mit Abriss und Recycling, ein Betrieb ist ausschließlich auf Recycling spezialisiert.

Die Befragung umfasste sowohl Fragen zu Abrisstätigkeiten als auch zum Recycling. Der Fragenkatalog und die Zusammenfassung der Transkription in Form einer Matrix sind in Anhang B dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den angegebenen Zahlenwerten um reine Schätzungen der Befragten handelt und dass eine klare Abgrenzung von Wohn- zu Nichtwohngebäuden nicht möglich war.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass der Abriss von Wohngebäuden gegenüber Nichtwohngebäuden einen geringen Anteil aufweist (30 % und < 50 %). Die Gründe für den Abbruch von Bauwerken liegen nicht nur im konstruktiven Versagen der Bausubstanz, sondern auch in Nachverdichtungs-, Folgenutzungs- und Umbaumaßnahmen. Dabei spielt der finanzielle Aspekt eine wesentliche Rolle: die Kosten für den Umbau eines Gebäudes sind oft höher als für einen Abriss und anschließenden Neubau. Dies führt dazu, dass Gebäude nicht entsprechend angepasst, sondern gänzlich entsorgt werden. Bei der Frage nach dem Alter der abgerissenen Gebäude ergab sich eine relativ weite Zeitangabe zwischen 20 und über 50 Jahren. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Information sich sowohl auf Wohn- als auch auf Nichtwohngebäude bezieht. Eine differenzierte Darstellung der Daten ist aus dem Grund nicht möglich, da die Abrissunternehmen aus Interessensmangel keine Statistik dazu führen.

Typisch beim Abbruch anfallende Materialien sind nach Aussagen der Fachleute unter anderem Mineralik, Holz, Glas und Metalle. Die Entsorgungs- und Recyclingverfahren sind von der jeweiligen Stoffgruppe abhängig. Beton und Bauschutt werden zu großen Teilen recycelt, teilweise wiederverwertet und zu geringen Mengen entsorgt. Altholz wird üblicherweise thermisch verwertet. Laut Experten lassen sich heute 60 bis 90 % des Bauschutts recyceln (Beton zu 90 %). Allerdings liegt in der Praxis die Beobachtung vor, dass das Recycling zukünftig erschwert werden könnte. Zum einen können feste Verbindungen (z. B. Klebeverbindungen) einzelner Fraktionen die stoffreine Materialtrennung erschweren. Zum anderen entwickeln sich die technischen Aufbereitungsverfahren nicht so schnell wie die Baustoffe bzw. Bauteile. Zudem spielt der Wirtschaftlichkeitsfaktor eine deutliche Rolle, sodass die erforderlichen Aufbereitungstechnologien noch zu kostspielig sind. Daraus konnten eindeutige Appelle aus der Recyclingpraxis festgehalten werden: sie fordert für die Planung und den Bau von Gebäuden monolithische Bauweisen mit lösbaren Verbindungen und Konzepte nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip. Außerdem sollte die ökonomische Betrachtung der Immobilien lebenszyklusbasiert erfolgen, sodass die Kosten für Abbruch und Aufbereitung bereits bei der Planung der Bauten Beachtung finden.

Auf Basis der Praxisaussagen wurde die Recyclingfähigkeit abgebrochener Baustoffe als zweiter Einflussfaktor definiert, der die zukünftigen Materialströme beeinflusst. In Kapitel 5.2.6 wird dieser Parameter weiter untersucht. Dabei wurde berücksichtigt, inwieweit die recycelten Stoffe als Baumaterialien in der Zukunft zur Verfügung stehen könnten und welcher Anteil weder recycelt noch wiederverwendet werden kann.

5.2.2. Analyse der Dateninfrastruktur, Datenverfügbarkeit und Datenbeschaffung

Wie in vorherigen Kapitel beschrieben, wurde die Lebensdauer eines Gebäudes als Parameter definiert, der die zukünftigen Stoffströme beeinflusst. Aus der durchschnittlichen Lebensdauer lässt sich der voraussichtliche Abbruch eines Gebäudes ableiten. Hierzu wird die Angabe des Erstellungsjahres eines Gebäudes benötigt. Wie in Kapitel 5.1.2 geschildert, enthält das bayerische 3D-Gebäudemodell diese Information nicht. Die bereits vorgestellte Statistik (*Zensus*) [23] liefert zwar Aussagen zu den Gebäudealtersklassen, in Anbetracht der großen Zeitspannen (teilweise 29 Jahre) sind die Angaben jedoch zu ungenau. Daher benötigt es präzisere Aussagen zum Datum der Baufertigstellung von Wohngebäuden in Bayern, um deren Abrisszeitpunkt vorhersagen zu können.

Auf Anfrage beim Bayerischen Landesamt für Statistik nach Informationen zu den Erstellungsjahren der Wohngebäude in Bayern wurde die webbasierte Datenbank *GENESIS* vorgestellt. Die *GENESIS* Datenbank ist ein gemeinsames statistisches Informationssystem des Bundes und der Länder. Die Datenbank ist online verfügbar und es ist möglich, die verfügbaren Werte in Form von Tabellen abzurufen.

So existiert eine Tabelle zur Statistik der Baufertigstellungen von Wohngebäuden in Bayern zwischen 1969 und 2020 (ohne 1970). Die Gebäude werden nach der Wohnungsanzahl differenziert, sodass eine Zuordnung zu Ein-/ Zweifamilien- und Mehrfamilienhäusern möglich ist. Damit sind näherungsweise die letzten 50 Jahre der Bautätigkeit in Bayern abgebildet. Dennoch besteht eine Datenlücke für Gebäude mit Erstellungsjahren vor 1969.

Bei der Möglichkeit zur Schließung dieser Datenlücke wurde zunächst untersucht, in wie weit sich die prozentualen Verteilungen der Wohngebäude in Bayern und in München ähneln. Dies begründet sich daher, dass die Landeshauptstadt München auf Anfrage die in Kapitel 5.1.2 beschriebene Gebäudedatei der Stadt München für Untersuchungszwecke zur Verfügung gestellt hat. Damit konnte die Datei nach der Prüfung der Übertragbarkeit für Hochrechnungen genutzt werden. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit wurden die Angaben der Zensus Statistik für den jeweiligen Betrachtungshorizont herangezogen. Abbildung 11 zeigt die Gegenüberstellung der Anteile von Ein-/ Zwei- und Mehrfamilienhäusern in der jeweiligen Baualtersklasse in Bayern und in München. Zwar ähneln sich die Verteilungen der Wohngebäude in der jeweiligen Baualtersklasse, dennoch bestehen zum Teil große Unterschiede bei den Gebäudetypen innerhalb einer Altersgruppe. Dies ist beispielsweise bei den Mehrfamilienhäusern aus den Jahren 1949 bis 1978 festzustellen: In Bayern hat diese Gruppe einen Anteil von ca. 7 % des Bestandes, in München hingegen ist der Wert mit etwa 21 % dreimal so hoch.

Zudem wurde die anteilige Zusammensetzung des Stofflagers im Wohngebäudebestand Bayerns und Münchens untersucht (s. Abbildung 12). Trotz der zum Teil stark unterschiedlichen Verteilung der Gebäudetypen im jeweiligen Betrachtungsraum, sind die prozentualen Verteilungen der Baustoffgruppen sehr ähnlich und können verglichen werden.

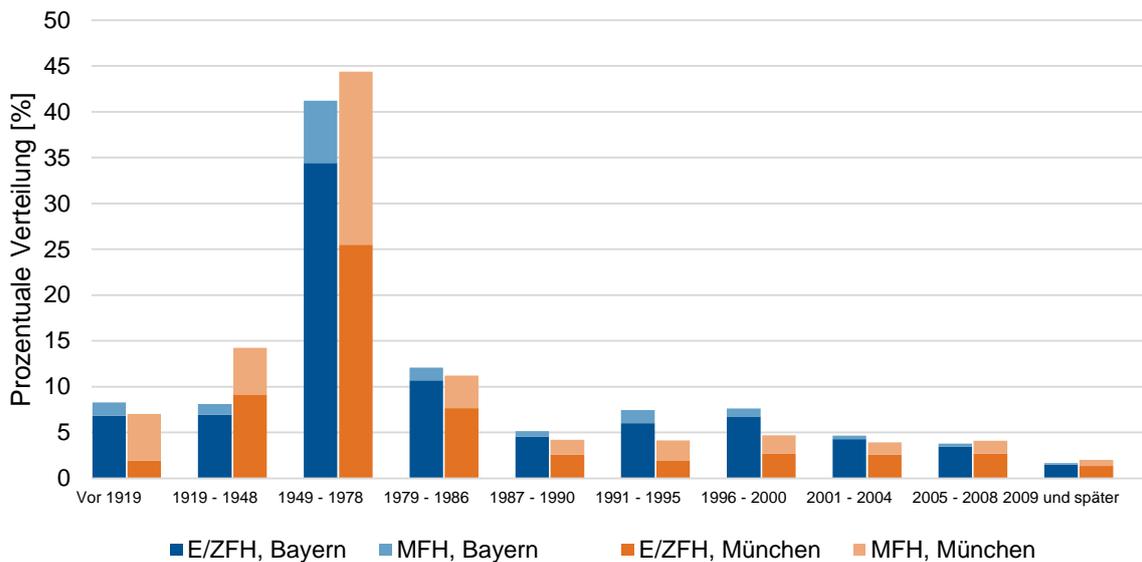


Abbildung 11: Vergleich der prozentualen Verteilung der Wohngebäude in Bayern & in München nach Gebäudeart und nach Baujahren, eigene Darstellung nach [23]

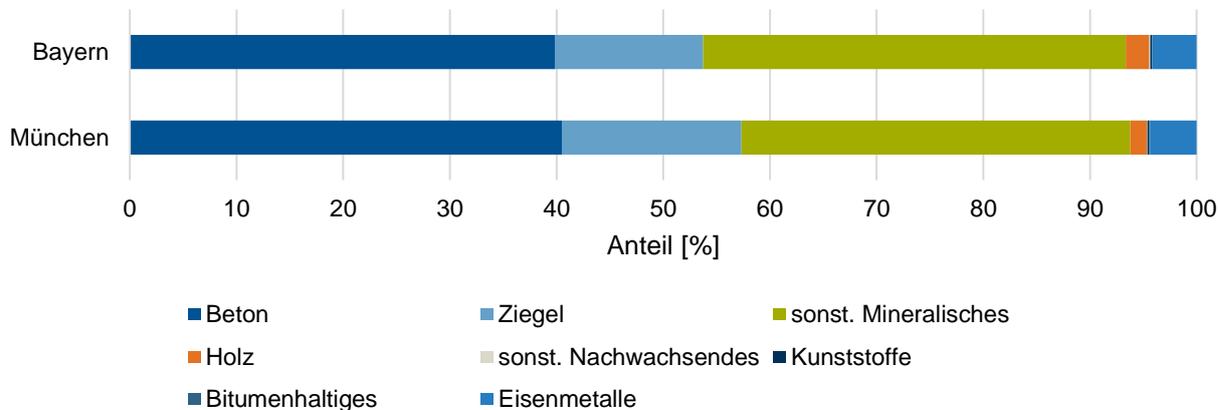


Abbildung 12: Anteilige Zusammensetzung des Stoffdepots im Wohngebäudebestand in Bayern und in München, eigene Darstellung nach [23] und [19]

Zwar stimmen die Anteile der Bautypgruppen in Bayern und München nicht gänzlich überein, dennoch gibt es eine starke Ähnlichkeit der prozentualen Anteile an Wohngebäuden einer Baualtersklasse vom Gesamtbestand. Zudem zeigte der Vergleich der stofflichen Zusammensetzung der beiden Bestände eine gewisse Gleichwertigkeit. Aus diesen Gründen wurde die Gebäudedatei der Stadt München [34] näherungsweise herangezogen, um die Datenlücken im Hinblick auf den Zeitpunkt der Errichtung der Wohngebäude zu schließen (vgl. Kapitel 5.1.2).

Die Gebäudedatei der Stadt München enthält Informationen, wie z.B. Erstellungsjahr, zu einem jedem Gebäude, welches sich an diesem Standort befindet. Dadurch lassen sich umgekehrt Angaben zur Anzahl der errichteten Wohngebäude in einem bestimmten Baujahr ableiten. Zur

Vervollständigung der fehlenden Daten des Freistaates wurden im Betrachtungsraum München die Anteile eines jeden Baujahres innerhalb seiner Baualtersklasse gebildet. Diese Anteile wurden anschließend auf die Anzahl der Ein-/ Zwei- sowie Mehrfamilienhäuser innerhalb einer Baualtersklasse in Bayern übertragen. Das Ergebnis sowie die Zusammenführung aller Daten sind in Abbildung 13 zu sehen. Der grün hinterlegte Bereich der Grafik zeigt die Werte, die die GENESIS Datenbank der Bayerischen Statistik zur Verfügung stellt. Der orange Bereich gibt die Hochrechnungen wieder, die mittels der Gebäudedatei der Stadt München durchgeführt wurden. Hier sind die hohen Peaks besonders auffällig, die durch die Anteile aus der Münchener Gebäudedatei verursacht werden. Auf Anfrage bei den zuständigen Behörden nach dem Grund der Auffälligkeit wurden diese auf die Nacherhebungen zurückgeführt. Da die erstmalige Gebäudezählung im Jahr 1968 durchgeführt wurde, konnten einige Gebäude, die zuvor errichtet wurden, keinem konkreten Jahr zugeordnet werden. Daher fand auch hier die Einordnung von Gebäuden zu den entsprechenden Baualtersklassen statt. Es bedeutet, dass beispielsweise Gebäude mit einem Erstellungsjahr zwischen 1919 und 1948 dem Baujahr 1948 zugeordnet wurden.

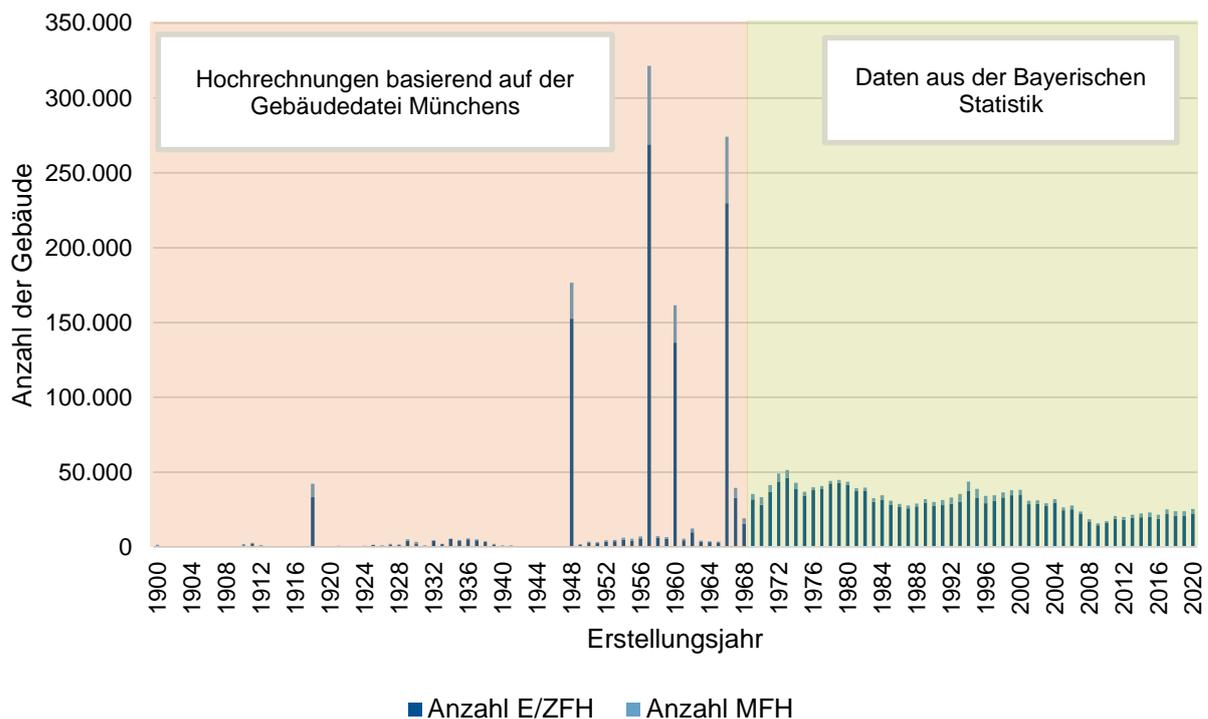


Abbildung 13: Gebäudeverteilung in Bayern nach Erstellungsjahr der Gebäude, eigene Darstellung nach [23], [34], [35]

Das beschriebene Vorgehen weist gewisse Ungenauigkeiten, wie die Ausbildung der Peaks, auf, die auf Grund der aktuell fehlenden Datengrundlage für bayerische Gebäude vor 1969 nicht verringert werden können. Deshalb wurde im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens die in Abbildung 13 dargestellte Gebäudeverteilung für weitere Berechnungen herangezogen.

5.2.3. Methodik zur Bestimmung der zukünftigen Materialströme aus dem Wohngebäudebestand

In den vorherigen Kapiteln wurden folgende Angaben herausgearbeitet:

- Stoffliche Zusammensetzung unterschiedlicher Gebäudetypen (vgl. Kap. 5.1.2)
- Zwei Szenarien zur durchschnittlichen Lebenserwartung von Wohngebäuden (vgl. Kap. 5.2.1)
- Statistische Verteilung von Ein-/ Zwei- und Mehrfamilienhäusern nach Erstellungsjahr (vgl. Kap. 5.2.2)

Im Folgenden wird eine Methodik aufgezeigt, die diese Informationen zum Stoffstrommodell zusammenführt. Der Grundgedanke des Modells besteht darin, den Zeitpunkt des Abbruchs der Wohngebäude in Abhängigkeit seines Erstellungsjahres vorherzusagen. Aus der jährlichen Menge an abgerissenen Gebäuden können über die Gebäudetypologien die daraus freiwerdenden Stoffströme bestimmt werden.

Zunächst einmal bedarf es einer tieferen Betrachtung der Abrissjahre. Theoretisch wird das Abrissjahr eines Gebäudes durch seinen Bauzeitpunkt und die Lebenserwartung bestimmt:

$$\text{Erstellungsjahr} + \text{erwartete Lebensdauer} = \text{Abrissjahr}$$

Bei einer so großen Stichprobe ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, dass alle Gebäude mit demselben Erstellungsjahr zum gleichen Stichjahr abgerissen werden. Denn wie bereits erwähnt, hängt die erwartete Lebensdauer von Gebäuden von unterschiedlichen Faktoren, wie z. B. der Materialqualität ab. Die in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Kennwerte zu Lebensdauern geben lediglich die Theorie wieder, die Realität kann im Einzelfall davon abweichen. Hier ist es also empfehlenswert mit statistischen Verteilungen zu arbeiten. In [5], [36], [37] beschreiben die Autoren die Bestimmung verschiedener Lebensalter mit der Normalverteilung. Bei der Normalverteilung handelt es sich um eine Glockenkurve, die symmetrisch um einen Erwartungswert verläuft. Diese sagt aus, dass die Werte einer Stichprobe in einem gewissen Bereich liegen. Die Dichtefunktion der Normalverteilung wird mit der folgenden Formel beschrieben:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Die Variabel μ beschreibt den Erwartungswert der Normalverteilung und bildet gleichzeitig das Maximum der Funktion ab. Bei der Variable σ handelt es sich um die Standardabweichung, die die Ausprägung der Dichtefunktion bestimmt. Die Standardabweichung wird aus dem minimal und dem maximal zu erwartenden Wert berechnet, wobei sie ein Sechstel von der Differenz der beiden Werte beträgt. Das durch die Standardabweichung definierte Intervall beinhaltet 99,73 %

aller Werte einer Stichprobe. Wird für x schließlich die gewünschte Zufallsvariable angegeben, ergibt die Berechnung der Formel die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Variablen an.

Übertragen auf die Lebenserwartung von Wohngebäuden ergeben sich für Szenario 1 und 2 die in Abbildung 14 dargestellten Normalverteilungen. Hier liegen die Erwartungswerte bei 80 (Szenario 1) und bei 100 Jahren (Szenario 2). Der minimal und der maximal erwartete Wert in Szenario 1 liegt bei 60 und bei 100 Jahren (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Standardabweichung von Szenario 1 ergibt sich aus einem Sechstel der Differenz der beiden Werte somit zu 6,67 und wird ebenfalls auf das Szenario 2 übertragen. Damit verlaufen die beiden Kurven auf die gleiche Weise, lediglich die Maxima sind auf der x-Achse um einen Wert von 20 Jahren verschoben. Auf der y-Achse der Darstellung kann die Auftretenswahrscheinlichkeit eines ausgewählten Gebäudealters der beiden Varianten abgelesen werden. Beispielsweise liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wohngebäude das Alter von 90 Jahren erreicht, sowohl bei Szenario 1 als auch bei Szenario 2 bei etwa 2 %.

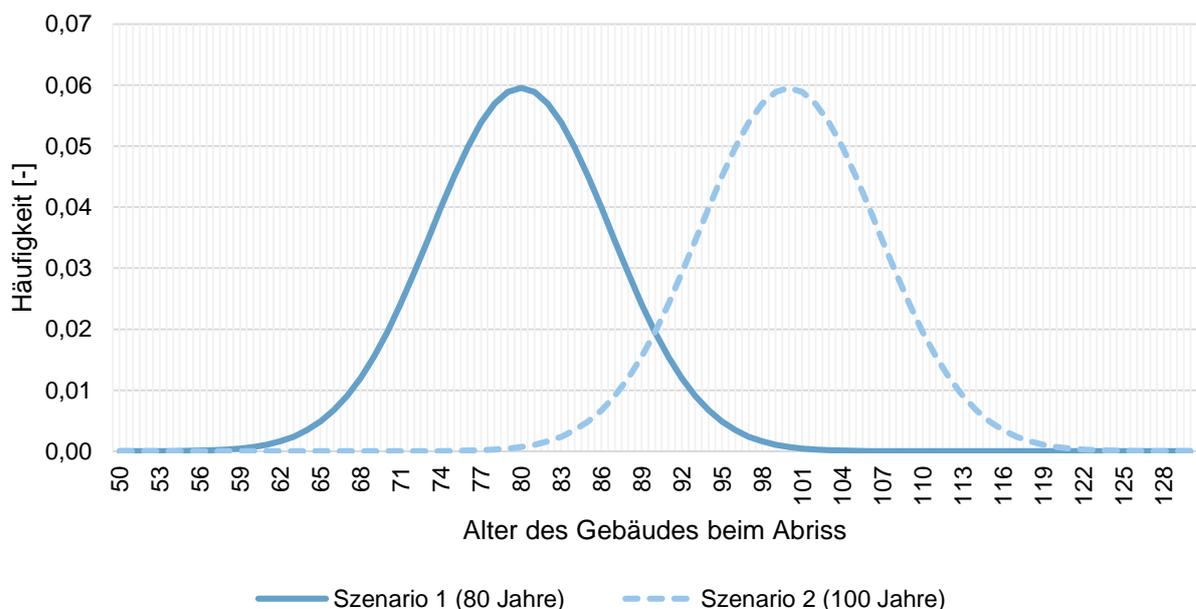


Abbildung 14: Dichtefunktion der Normalverteilung. Szenario 1: Erwartungswert = 80; Szenario 2: Erwartungswert = 100, eigene Darstellung

Mit der Information über die Anzahl der jährlich errichteten Gebäude führt die Anwendung der Normalverteilung zur Bestimmung einer zeitlichen Abrisskurve dieser Gebäude. Diese kann mit den stofflichen Kennwerten der Gebäudetypologien gekoppelt werden, sodass sich hieraus die zukünftigen Stoffströme durch Abrisstätigkeiten ableiten lassen.

5.2.4. Zukünftig anfallende Stoffströme aus dem bayerischen Wohngebäudebestand

Basierend auf der vorgestellten Methodik werden im Folgenden die Ergebnisse zu der Abrisstätigkeit im bayerischen Wohngebäudebestand sowie zu den daraus frei werdenden Materialströmen bis zum Jahr 2080 prognostiziert.

Die Bestimmung der zukünftigen Gebäudeabgänge in Bayern lieferte die in Abbildung 15 vorgestellten Abrisskurven. Anhand dieser kann die Anzahl der abgerissenen Gebäude, differenziert nach Gebäudetyp und Entwicklungsszenario, in einem ausgewählten Jahr abgelesen werden. Wie bereits bei der Vorstellung der Glockenkurve der erwarteten Lebensdauern in Szenario 1 und 2 kann auch hier festgestellt werden, dass die beiden Szenarien sich lediglich bei der Verschiebung der Kurven auf der x-Achse unterscheiden. Wird das Maximum der Abgänge der Ein- und Zweifamilienhäuser (E/ZFH) in Szenario 1 im Jahr 2045 mit 43.884 Abrissen erreicht, ist dieses im Szenario 2 entsprechend 20 Jahre später im Jahr 2065 zu erwarten. Die Höchstwerte werden dabei durch den Abgang der Gebäude der 50er und der 60er Jahre dominiert. Analog dazu verhalten sich die Abrisskurven der Mehrfamilienhäuser. Allerdings wurde hier der Höhepunkt der Abrisstätigkeit etwas früher auf das Jahr 2042 bzw. 2062 mit 7.934 Abgängen errechnet. Die große Differenz zwischen den Abgängen der Ein-/Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser lässt sich mit einem deutlich geringeren Anteil der Mehrfamilienhäuser am Gebäudebestand erklären (vgl. Abbildung 13).

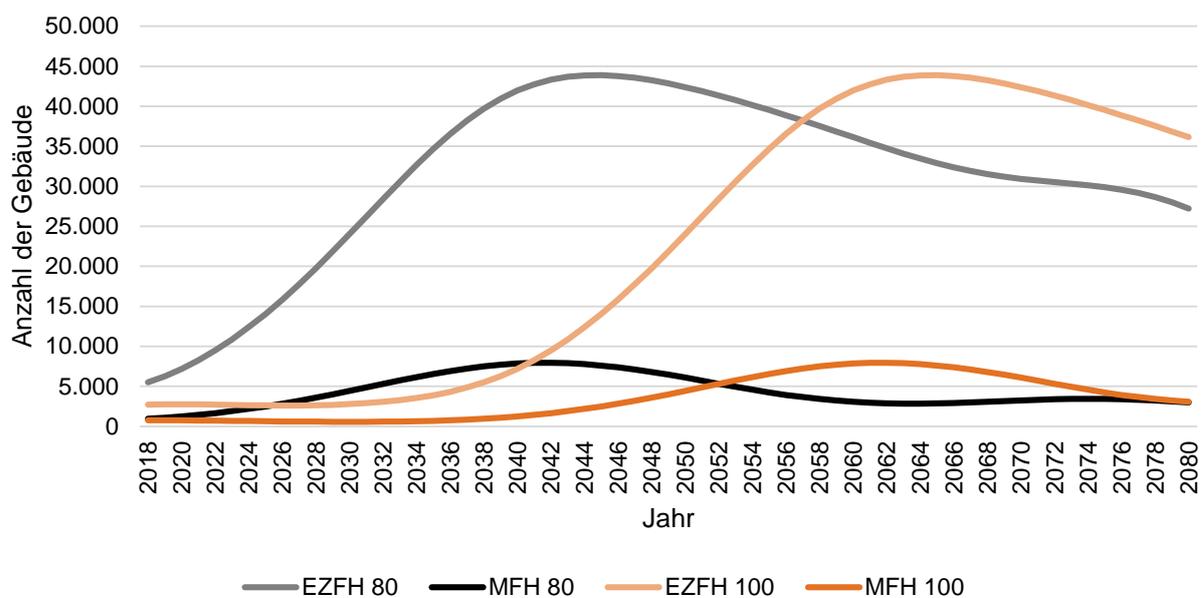


Abbildung 15: Anzahl der Wohngebäudeabgänge nach Gebäudetyp und Jahr; Szenario 1: Erwartungswert = 80 Jahre; Szenario 2: Erwartungswert = 100 Jahre; eigene Darstellung

Danach wurden die Abrisskurven der verschiedenen Gebäude an die Stoffkennwerte der entsprechenden Gebäudetypologien gekoppelt. Damit wurden die zukünftigen Stoffströme bestimmt, die durch den Abriss von Wohngebäuden hervorgerufen werden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 16 für das Szenario 1 und in der Abbildung 17 für das Szenario 2 dargestellt. Die Stoffstromkurven der beiden Szenarien verlaufen analog zu den Abrisskurven um 20 Jahre versetzt. Der Scheitelpunkt der frei werdenden Materialien in Szenario 1 wird mit etwa 24 Mio. Tonnen im Jahr 2043 und in Szenario 2 im Jahr 2063 erwartet. Basierend auf dem berechneten Abrissverhalten des Wohnbestandes werden die in den nächsten 30 Jahren anfallenden Mengen an Baumaterialien insbesondere durch den Abgang der Gebäude der 50er und der 60er Jahre hervorgerufen. Wie bereits bei der Analyse des Stoffdepots des Bestandes dominieren auch hier die mineralischen Fraktionen, besonders Beton.

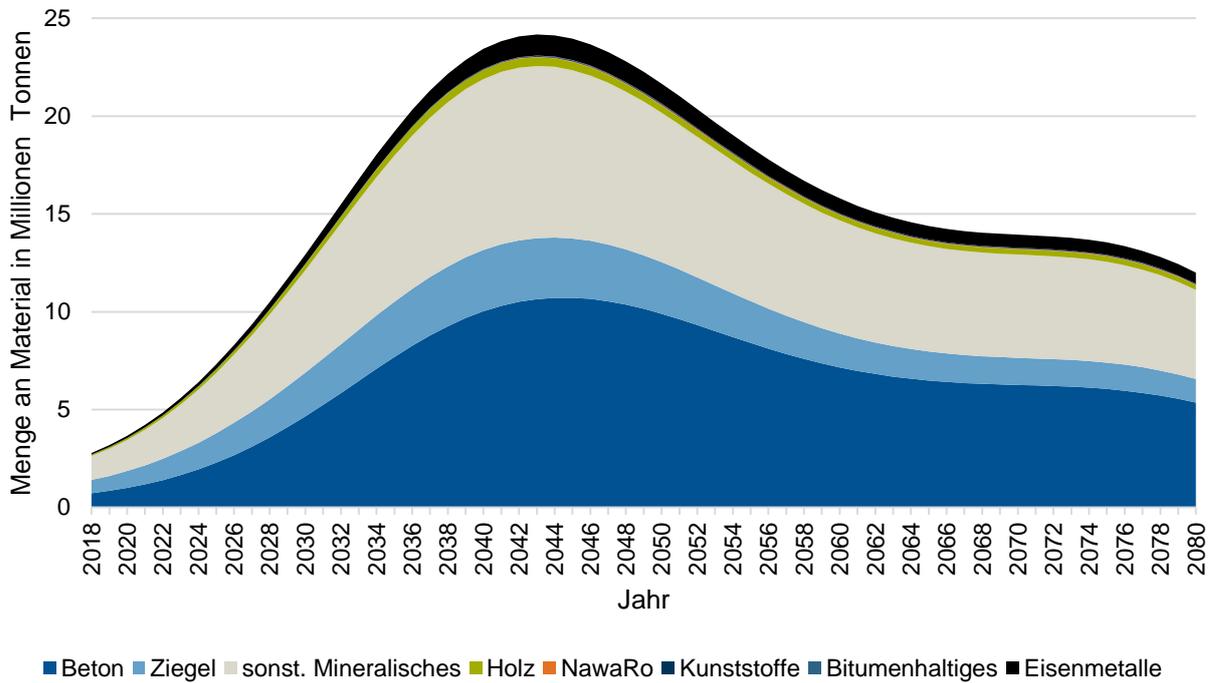


Abbildung 16: Anfallende Stoffströme durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 1: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre, eigene Darstellung

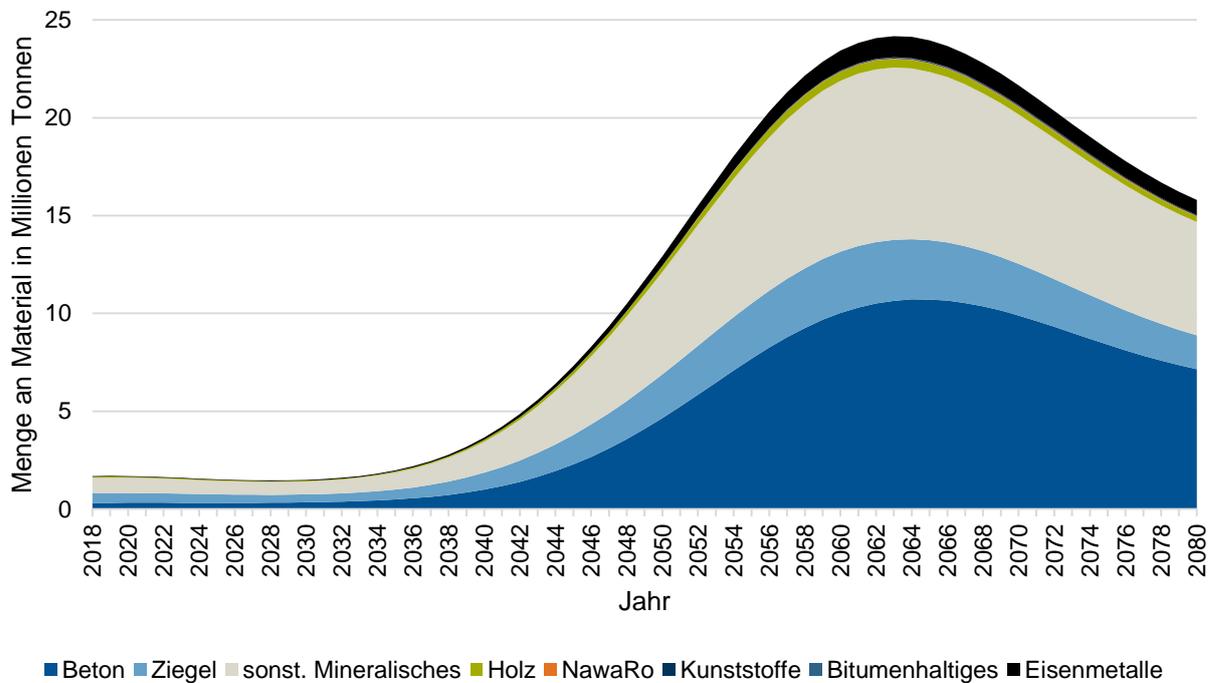


Abbildung 17: Anfallende Stoffströme durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 2: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 100 Jahre, eigene Darstellung

Anfang 2022 erweiterten die Autoren der IÖR Gebäudetypologien ihre online Datenbank, indem die Datenblätter nun auch detailliertere Informationen zu der Beschaffenheit der Baustoffobergruppen enthalten [19]. Damit wurden die 10 Baustoffobergruppen in insgesamt 46 Baustoffuntergruppen unterteilt. Damit können die Stoffströme deutlich differenzierter analysiert werden. Abbildung 18 zeigt die segmentierte Zusammensetzung der Materialmengen, die in den nächsten Dekaden sowie im Jahr 2043 (Maximum) nach Szenario 1 (Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre) anfallen werden. Die Grafik zeigt diejenigen Baustoffe, deren Menge anteilig mehr als 1 % der anfallenden Gesamtmaterialeintrag beträgt. Damit ist hier insgesamt die Masse von etwa 97 % der anfallenden Materialien dargestellt. Die Tabelle mit allen Werten ist dem Anhang C zu entnehmen. In Szenario 2 (Lebensdauer der Gebäude = 100 Jahre) verschieben sie die berechneten Werte auf der x-Achse, sodass der dargestellte Verlauf mit einer Zeitverzögerung von 20 Jahren stattfindet.

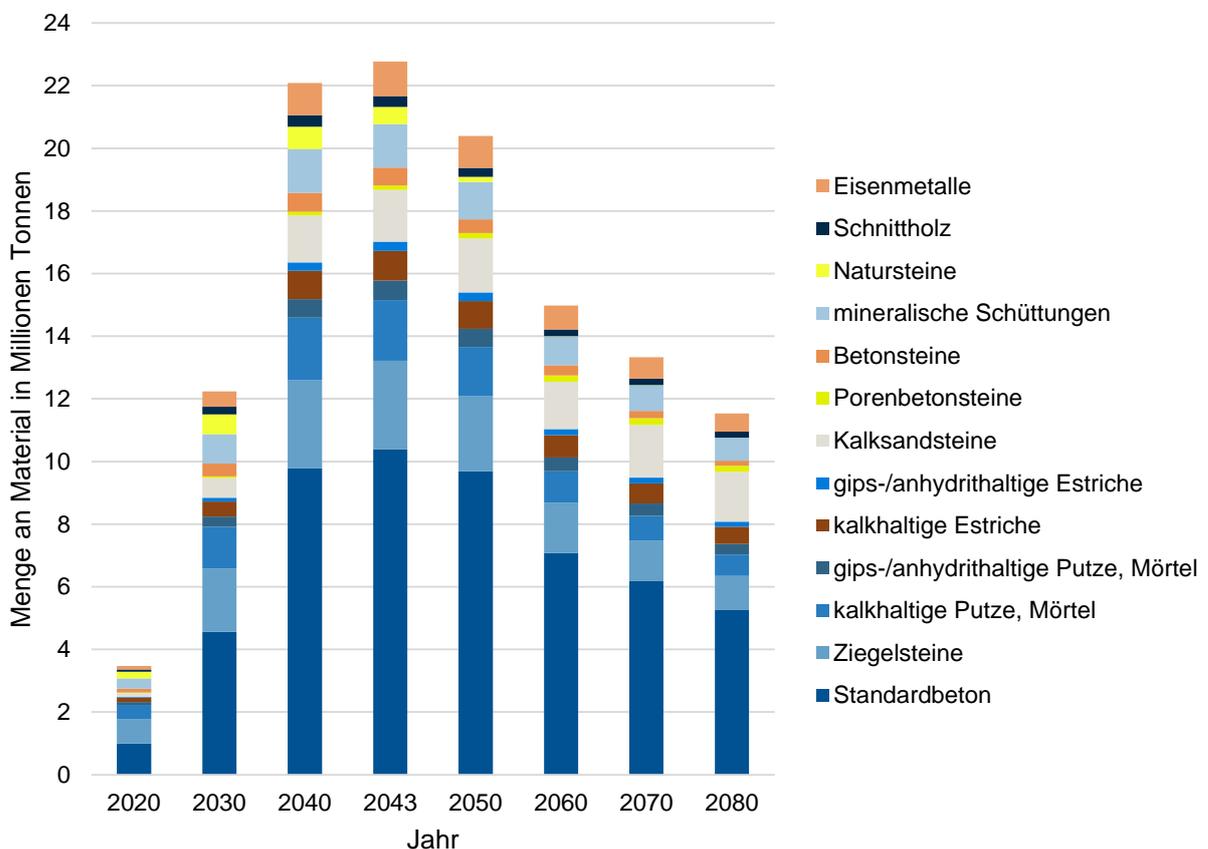


Abbildung 18: Anfallende Baumaterialuntergruppen durch Abriss von Wohngebäuden in Bayern; Szenario 1: erwartete Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre, eigene Darstellung

5.2.5. Validierung des Modells

Zur Validierung der entwickelten Methodik wurden zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz überprüfte die Anzahl der abgerissenen Gebäude. Der zweite Ansatz beschäftigte sich mit den anfallenden Mengen an Material durch die Gebäudeabrisse in Bayern.

Um die berechnete Anzahl der Wohngebäudeabgänge in Bayern überprüfen zu können, wurden Statistiken zu bayerischen Abrisstätigkeiten herangezogen. In den aktuell veröffentlichten Statistiken werden Abgänge ganzer Wohngebäude für die Jahre 2015 bis 2020 vorgestellt [38]. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der eigenen Berechnungen sowie die Angaben der Statistik für die Jahre 2018 bis 2020 in Tabelle 2 gegenübergestellt. Hier kann ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Quellen identifiziert werden. Die Ergebnisse der Berechnungen nach Szenario 2 (100 Jahre) liegen dabei näher an den statistischen Daten, als dies bei Szenario 1 (80 Jahre) der Fall ist. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der Statistik um die Erfassung der Genehmigungen zum Abriss der Gebäude und nicht um die tatsächlichen Abgänge. Der tatsächliche Gebäudeabgang kann also zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Damit sind die Daten nicht direkt vergleichbar und eine sichere Validierung der entwickelten Methodik nicht möglich. Dennoch sind pauschale Annahmen zur Lebensdauer der Gebäude kritisch zu hinterfragen.

Tabelle 2: Anzahl der Wohngebäudeabgänge in den Jahren 2018 - 2020 nach eigenen Berechnungen und nach der Bayerischen Statistik [38]

Jahr	Anzahl der Wohngebäudeabgänge		
	nach eigenen Berechnungen: Szenario 80 Jahre	nach eigenen Berechnungen: Szenario 100 Jahre	Nach Bayerischer Statistik [38]
2018	6.452	3.472	959
2019	7.365	3.509	1.012
2020	8.447	3.511	1.035

Im nächsten Schritt wurden die berechneten und die statistisch erfassten Materialmengen aus den Abrisstätigkeiten vergleichend beurteilt. Zur Validierung wurden die Daten der bayerischen Abfallstatistik aus dem Jahr 2018 genutzt [39]. Demnach entfallen auf die Kategorie *Bauschutt* etwa 10 Mio. Tonnen an Bauabfällen. Die in dieser Studie berechneten Mengen ergeben sich zu 2,8 Mio. Tonnen (Szenario 1) bzw. zu 1,7 Mio. Tonnen (Szenario 2). Auch hier können große Differenzen zwischen modellierten und statistischen Werten festgestellt werden. Allerdings ist die Statistik auch in diesem Fall nur bedingt zur Validierung geeignet.

Zum einen umfassen die Daten des Bayerisches Landesamtes für Statistik nicht das bayerische Bauabfallaufkommen, sondern die in Bayern zur Verwertung und Beseitigung eingesetzten Bauabfälle. Dies führt sowohl zu zeitlichen als auch zu örtlichen Diskrepanzen. Die Abfälle können zu einem früheren Zeitpunkt angefallen sein, als dies in der Statistik dokumentiert wird. Auf geografischer Ebene können die Abfälle außerhalb Bayerns entstanden sein und in Bayern lediglich aufbereitet werden. Ebenfalls können Bauabfälle aus Bayern außerhalb der Landesgrenzen bearbeitet werden. Zum anderen beinhalten die statistischen Daten die Mengen zu allen Baumaßnahmen (auch Sanierung und Umbau) sowie zu allen Gebäudetypen (auch Nichtwohngebäude). Es wird vermutet, dass der große Gewichtsunterschied zwischen der Statistik und den hier berechneten Massen besonders durch die Berücksichtigung der

Nichtwohngebäude hervorgerufen sein kann. Eine Prüfung dessen ist jedoch auf Grund von fehlenden Daten nicht möglich.

Wird davon ausgegangen, dass bedingt durch den hohen mineralischen Anteil des Bauschutts, die größten Materialmengen aus dem Freistaat stammen und auch hier aufbereitet werden, kann zumindest eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden. Die in dieser Studie berechneten Abfallmengen der Wohngebäudeabrisse müssen geringere Werte als die Bau- und Abbruchabfälle aller Gebäudearten in der Statistik aufweisen. Diese Voraussetzung ist mit den oben beschriebenen Mengenangaben erfüllt.

5.2.6. Recyclingfähigkeit und potenzielle Rezyklatanteile

Nach Abbruch der Wohngebäude fallen die darin enthaltenen Materialien zumeist als Abfälle an. Der Umgang mit Abfällen ist über die Abfallrahmenrichtlinie auf der europäischen Ebene und über das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) auf der Bundesebene geregelt. Das KrWG handelt im Sinne eines schonenden Ressourcenverbrauchs nach einer fünfstufigen Hierarchie:

- Vermeidung geht vor
- Vorbereitung zur Wiederverwendung geht vor
- Recycling geht vor
- sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung, geht vor
- Beseitigung [40].

Die *Vermeidung* zielt darauf ab, Abfälle gar nicht erst entstehen zu lassen (z.B. durch die Umnutzung eines Gebäudes). Die *Wiederverwendung* bezweckt einen erneuten Einsatz eines Produkts (z.B. Einbau eines Stahlträgers aus dem Gebäude A in das Gebäude B), womit das Erzeugnis seine ursprüngliche Qualität nicht verliert. Verwertung kann stofflich oder energetisch stattfinden. Die *sonstige Verwertung* beinhaltet die energetische Verwertung (z.B. Verbrennung von Holzbauteilen zwecks Energiegewinnung) sowie die Verwertung in Form von Verfüllungen (z.B. Verfüllung geeigneten Bauschutts in Tagebauen; Form der stofflichen Verwertung). Zusammen mit der *Beseitigung* sollte die *sonstige Verwertung* im Sinne der Kreislaufwirtschaft, vorausgesetzt die Schadstofffreiheit ist gegeben, nach Möglichkeit vermieden werden. [41]

Bei *Recycling* (stoffliche Verwertung gemäß KrWG) handelt es sich laut [41] um einen Oberbegriff, der die Maßnahmen *Weiterverwendung*, *Wiederverwertung* und *Weiterverwertung* umfasst. Die Tabelle 3 gibt eine Übersicht über diese Instrumente und deren Eigenschaften. Die *Weiterverwendung* zielt demnach darauf ab, ein Produkt in seiner ursprünglichen Form, jedoch nicht für den ursprünglichen Zweck, erneut einzusetzen (z. B. Herstellung von Lärmschutzwänden aus Plattenbauteilen des Wohnungsbaus). Die *Wiederverwertung* führt durch

die Auflösung der anfänglichen Produktgestalt zu einem neuen Objekt mit der anfänglichen Qualitätsstufe (z. B. Einschmelzen des Stahlträger A mit Profil A zum Stahlträger B mit Profil B). Die *Weiterverwertung* schließlich beschreibt einen Prozess, bei dem es sowohl zur Auflösung der Gestalt als auch zu einer Qualitätsminderung des Sekundärstoffs kommt (z.B. Brechen des Bauschutts und Einsatz der kleinen Gesteinskörnung im Straßenbau). Sowohl bei der Weiterverwendung als auch bei der Weiterverwertung kann als s. g. Downcycling beschrieben werden, bei dem die Sekundärstoffe gegenüber den Primärstoffen Qualitätseinbußen erfahren. Mit diesen Strategien kann keine vollständige Kreislaufwirtschaft erreicht werden. [41]

Tabelle 3: Übersicht der Recycling-Begriffe, nach [40] und [41].

Begriffe des KrWG [40]	Weitere in der Literatur gebräuchliche Unterteilung [41]	Auflösung der Produktgestalt	Kein Qualitätsverlust	Qualitätsverlust = Downcycling
Wiederverwendung			X	
Recycling	Weiterverwendung			X
	Wiederverwertung	X	X	
	Weiterverwertung	X		X

Die Einordnung in Abfallkategorien erfolgt nach der Abfallverzeichnisverordnung. Hierbei erhält jede Abfallart in Abhängigkeit ihrer Herkunft und ihrer Zusammensetzung einen sechsstelligen Abfallschlüssel. Die Bezeichnungsschlüssel bilden die Grundlage für die jährlich durchgeführten Statistiken zum Verbleib der Abfälle. Beim Abbruch ganzer Gebäude ist mit Materialien zu rechnen, die in den Kategorien Bauschutt, Bauabfälle auf Gipsbasis sowie Baustellenabfällen landen. Der Bauschutt umfasst mineralische Fraktionen wie z.B. Beton, Ziegel und Backsteine, jedoch keine Böden und Steine. Zu Abfällen auf Gipsbasis gehören unter anderem Gipsputze, -estriche und -platten. Die Materialgruppen Holz, Glas, Kunststoff, Metalle und Dämmmaterial werden den Baustellenabfällen untergeordnet. Alle zwei Jahre veröffentlicht die Initiative Kreislaufwirtschaft Bau einen Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im deutschen Raum. Das Monitoring zum Jahr 2018 zeigt die Ergebnisse, wie in Abbildung 19 dargestellt. [42]

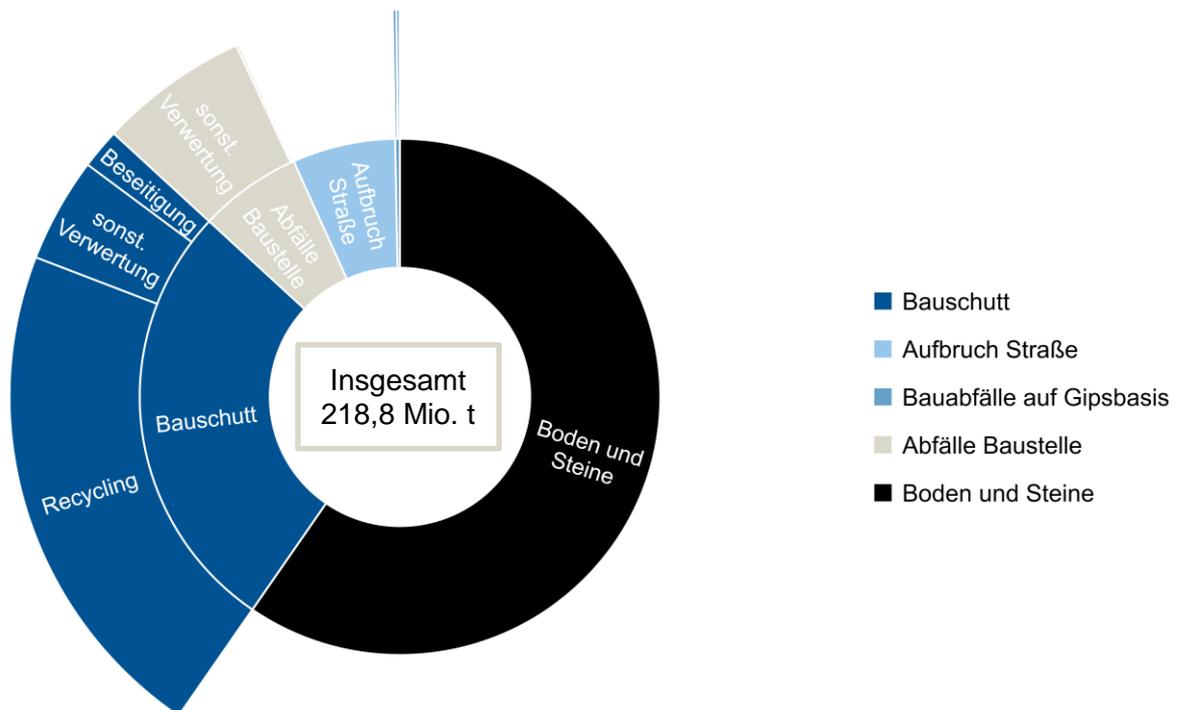


Abbildung 19: Aufkommen und Verbleib ausgewählter Bauabfälle in Deutschland im Jahr 2018, eigene Abbildung nach [42]

Hieraus wird deutlich, dass die Fraktionen Bauschutt und Baustellenabfällen das zweit- bzw. das drittgrößte Mengenaufkommen aufweisen. Bauabfälle auf Gipsbasis haben mit etwa 0,6 Mio. Tonnen an Material den geringsten Anteil an den Bau- und Abbruchabfällen. Die Grafik macht weiterhin den Verbleib der Abfallgruppen deutlich. Wird der größte Teil des Bauschutts dem Recycling zugeführt (78 %), so kann bei Baustellenabfällen fast ausschließlich die sonstige Verwertung verzeichnet werden (97 %). Allerdings handelt es sich bei den Recyclingmaßnahmen des Bauschutts hauptsächlich um die Verwertung im Tiefbau, was einen Downcyclingprozess darstellt. Die Argumentation, dass es hierbei um eine Substitution von Primärrohstoffen im Tief- und Straßenbau handelt, stößt auf ihre Grenzen, wenn bedacht wird, dass mittel- bis langfristig in diesen Sektoren kein großes Wachstum prognostiziert wird [43]. Die gipsbasierten Baustellenabfälle werden zu 50 % auf Deponien beseitigt und zu fast 50 % der sonstigen Verwertung zugefügt. Insgesamt kann also festgehalten werden, dass es bei den aktuell praktizierten Aufbereitungsmaßnahmen in Deutschland hauptsächlich zu einem Qualitätsverlust der anfallenden Stoffströme aus dem Hochbau kommt. Bzgl. kreislaufgerechten Wirtschaftens mit den Ressourcen im Bauwesen besteht also noch großer Handlungsbedarf.

Werden weiterhin die aktuellen Strategien zur Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen verfolgt, kann in Bayern nach Szenario 1 (Lebensdauer der Gebäude = 80 Jahre) mit dem Verbleib der Stoffe, wie in Abbildung 20 dargestellt, gerechnet werden. Die Hochrechnungen basieren auf den Ergebnissen aus Abbildung 18. Die dort gezeigten Baustoffgruppen wurden den Abfallgruppen nach der Abfallverzeichnisverordnung zugeordnet und mit den Angaben aus [42] verrechnet.

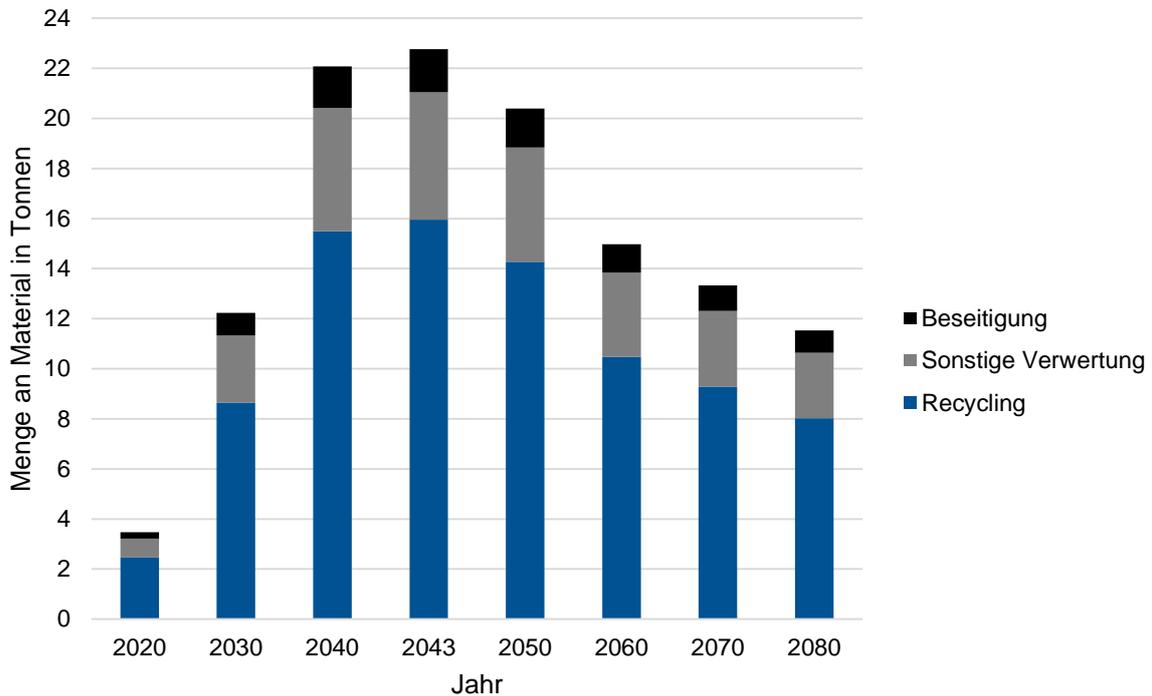


Abbildung 20: Verbleib der zukünftig aus dem Wohngebäudebestand anfallenden Materialien (Szenario 1), eigene Darstellung

Aus der Darstellung wird deutlich, dass zwar durchschnittlich 68 % der gesamten Materialmengen recycelt werden (z.B. durch Einsatz im Tiefbau), zumeist handelt es sich aber lediglich um Downcycling. Etwa 22 % der stofflichen Masse werden der sonstigen Verwertung (z.B. der energetischen Nutzung) zugeführt. Damit stehen diese Materialien als Baustoffe für den Hochbau nicht mehr zur Verfügung. Etwa 7 % der anfallenden Stoffmengen werden in Deponien beseitigt. Insgesamt bedeutet ein solches Wirtschaften einen (Qualitäts-)Verlust der Rohstoffe.

Die mangelhafte Aufbereitung der Bau- und Abbruchabfälle begründet sich unterschiedlich. Die Erklärungen reichen von der gesellschaftlichen Akzeptanz über den gesetzlichen Rahmen bis hin zu technischen Möglichkeiten beim Aufbereiten der Stoffströme. Letzteres hängt stark von der Recyclingfähigkeit der Materialien ab. Werden die Stoffe nach ihrer Herkunft und ihren Eigenschaften in Gruppen unterteilt, so können vier Oberkategorien definiert werden:

- biotische Stoffe (z.B. Jutedämmung aus Kaffeesäcken, s Abbildung 21),
- fossile Stoffe (z.B. EPDM-Dachabdichtungsbahn, s Abbildung 21),
- mineralische Stoffe (z.B. Ziegelsplitt, s Abbildung 21) und
- metallische Stoffe (z.B. Aluminium-Rahmenprofile, s Abbildung 21).

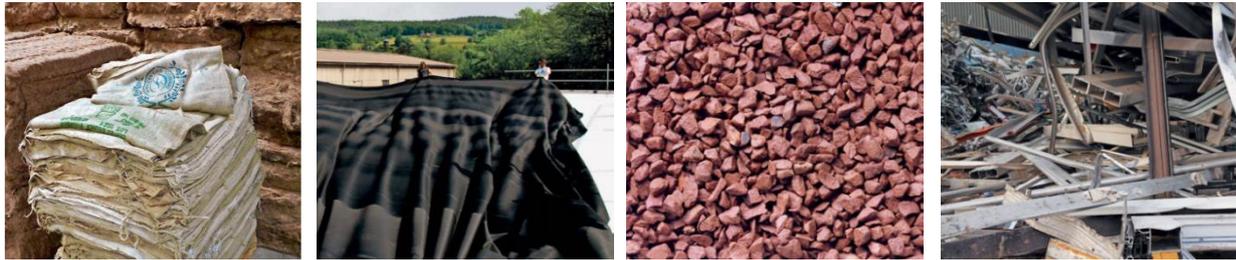


Abbildung 21: Beispiele der vier Oberkategorien der Bau- und Abbruchabfälle. Von links nach rechts: biotische, fossile, mineralische, metallische Stoffe. [41]

Innerhalb dieser Gruppen lassen sich gewisse Tendenzen zur Recyclingfähigkeit ableiten.

Biotische Stoffe sind nachwachsend und können sowohl pflanzlichen als auch tierischen Ursprungs sein. Da diese am Lebensende verrotten und anschließend im biotischen System münden, besteht hier naturgemäß ein geschlossener Kreislauf. Dabei müssen die Materialien unbehandelt sein. Holz, als bekanntester Vertreter dieser Gruppe, ist oft mit Holzschutzmitteln, Beschichtungen oder brandhemmenden Zusätzen versehen. Dies führt dazu, dass dieses Material zur Schadstoffzerstörung momentan meist der energetischen Verwertung zugefügt wird. Die stoffliche Verwertung findet bei der Herstellung von Spanplatten oder Komposten statt. Die Wiederverwendung von Konstruktionsholz wird quasi nicht praktiziert. Gründe dafür sind eventuelle Schadstoffproblematiken sowie mangelnde Gewährleistungsfähigkeit. Das Potenzial für qualitativ hochwertiges Recycling wäre allerdings groß: 75 Vol.-% der Hölzer vom Bau und vom Abbruch zeigen keine Holzschutzmittelbelastungen [44]. Technisch könnte der Anteil an Altholz in Spannplattenprodukten (s.g. Rezyklatanteil) von aktuell 13 % auf 90 % und in OSB-Platten aus nachhaltiger Forstwirtschaft von 0 % auf ca. 70 % gesteigert werden. [44], [43], [41]

Die Gruppe der fossilen Materialien umfasst u.a. Abdichtungen (z.B. Dampfbremsen, Abdichtungsbahnen aus Bitumen), Dämmungen (z.B. Polystyrol Hartschaum) sowie Gussasphaltestriche. Es handelt sich um Kunststoffe auf Erdölbasis und um Bitumen. Letzteres lässt sich gut recyceln, vorausgesetzt Sortenreinheit und Schadstofffreiheit sind gegeben. Dennoch wird es auf Grund seines hohen Heizwerts oft thermisch verwertet. Gleiches wiederfährt auch den minderwertigen Kunststoffgemischen. Kommt es zu einem Recycling der fossilen Stoffgruppe, handelt es sich primär um Downcycling. Dabei könnte der Rezyklatanteil einiger Produkte auf etwa 30 % bis 40 %, bei schadstofffreiem Gussasphaltestrich gar auf fast 100 % gesteigert werden. [41]

Die mineralischen Materialien überwiegen die anderen Stoffgruppen mengenmäßig deutlich. Dazu gehören u.a. Betone, Mauersteine, Gipskartonprodukte, Natursteine, Klinker, Glas, Keramik und andere. Bei der Weiterverwertung der Mineralik werden die Ausgangsstoffe in Körnungen gebrochen und es kommt zu einem hohen Qualitätsverlust des Materials. Zudem kann der Anteil an Sekundärstoffen in neuen Produkten (bei gleichbleibender Qualität) lediglich auf ca. 20 % bis 40 % erhöht werden. Nur einige wenige Baustoffe (z.B. Profilbauglas und Glaskeramik) haben

das Potenzial für hohe Rezyklatanteile von bis zu 100 %. Die Wiederverwendung eignet sich daher besser, um die Stoffkreisläufe zu schließen. Diese ist insbesondere bei Außenwandelementen, wie Naturwerksteinplatt, Faserzement- und Glasfaserbetonplatten, Vormauerklinkern sowie bei Mauer- und Dachziegeln möglich. [41], [43]

Prinzipiell lassen sich Metalle in zwei Gruppen aufteilen: Eisen- und Nichteisenmetalle. Ein wichtiger Vertreter der Eisenmetalle ist Stahl, der z. B. in Stützen und Armierungen zu finden ist. Aluminium, Zink und Kupfer gehören zu den Nichteisenmetallen. Die Metalle erfahren auch beim mehrfachen Recycling kaum Qualitätsverluste. Ihre Recyclingfähigkeit ist also sehr gut. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass deren Sortierung und Aufbereitung im Vergleich zu anderen Stoffen einfach und wirtschaftlich umzusetzen ist. Ein weiterer Grund ist, dass Deutschland auf den Import der wertvollen Rohstoffe angewiesen ist, da es selbst über keine nennenswerten Lager verfügt. Besonders vorteilhaft beim Recycling ist die Tatsache, dass es nicht nur den Einsatz von Primärrohstoffen reduziert, sondern auch den Energieaufwand gegenüber der Herstellung von Primärmaterial deutlich senkt (Aluminium um 95 %, Kupfer um etwa 85 %). Demnach sind in vielen neuen Produkten zwar vertretbare Rezyklatanteile zu finden, diese können dennoch weiter ausgebaut werden (z.B. bei Aluminiumprodukten). Außerdem ist die Wiederverwendung von metallischen Baukomponenten, z. B. die Wiederverwendung eines Stahlträgers nach der Nutzung in einem anderen Gebäude, zur effizienten Schließung von Materialkreisläufen prinzipiell gut möglich und sollte daher forciert werden. [41], [43]

Zusammenfassend konnte durch die Literaturrecherche sowie durch die Experteninterviews festgestellt werden, dass die Recyclingfähigkeit der Baustoffe von ihrer Schadstofffreiheit, ihrer Trennbarkeit und ihrer Sortenreinheit abhängt. Die Möglichkeit zur Trennung der Baukomponenten und -stoffe wird bereits bei der Planung und beim Bau der Gebäude beeinflusst. Einfache Bauweisen mit einer geringen Anzahl an verschiedenen Baustoffen (z.B. die monolithische Bauweise) und mit lösbaren Verbindungen (z.B. Schraubverbindungen) begünstigen stark das Wiederverwenden von Materialien und deren Recycling. Zudem bestimmt die Abrissttechnik die spätere Sortenreinheit des Abbruchmaterials. Hierbei ist auf den selektiven Rückbau zu achten. Derzeit ist diese Technik aufgrund wirtschaftlicher Faktoren gegenüber den konventionellen Abrissverfahren unterrepräsentiert. Beim Recycling gibt es inzwischen einige Verfahren, die ein hochwertiges Baustoffrecycling ermöglichen. Hierzu zählt beispielsweise die elektrodynamische Fragmentierung, die es erlaubt, Verbundmaterialien wie Altbeton in die einzelnen Komponenten aufzutrennen und damit hochwertige Rezyklate zu erzeugen. Die Technologie bedarf jedoch weiterer Entwicklungsarbeit, um größere Volumenströme realisieren zu können [45]. Insgesamt besteht auf dem Gebiet der Aufbereitungstechniken noch hoher Entwicklungsbedarf.

6. Fazit

Im ersten Schritt zeigt die vorliegende Studie auf, wie der mit aktuell lückenhaften Datenlage ein Rohstoffkataster in Bayern umgesetzt werden kann. Die in Kapitel 5.1.3 vorgestellte Methodik liefert einen guten Ansatz, um die Informationslücken mittels statistischer Erfassungen zu füllen. Dies zeigt auch die Validierung der Ergebnisse durch den Vergleich des verbauten Stoffdepots des bayerischen Wohngebäudebestandes mit weiteren Studien (vgl. Kapitel 5.1.4). Demnach verfügt der bayerische Wohngebäudebestand über 1.305 Mio. Tonnen an verbautem Material. Durch die statistischen Daten auf kommunaler Ebene kann das Stofflager geografisch deutlich eingegrenzt werden, wie das Beispiel der Landeshauptstadt München zeigt. Besonders bei der Mineralik, die durch regionale Handlungs- und Aufbereitungswege geprägt ist und deren Anteil mengenmäßig gegenüber anderen Fraktionen deutlich größer ist, ist dieses Wissen von besonderer Bedeutung. Somit können die regionale Infrastruktur und kurze Transportwege gefördert werden. Zudem unterstützt das Wissen über die räumliche Nähe von Abriss und Neubau die Kreislaufwirtschaft. Insgesamt hängen die Ergebnisse der Berechnungen des Stoffdepots stark von der Qualität der statistischen Daten sowie der Gebäudetypologien ab. Die Umsetzung einer georeferenzierten Rohstoffkartierung auf Basis von 3D-Gebäudemodellen ist dann möglich, wenn die Gebäudemodelle mit semantischen Daten, wie dem Baujahr, angereichert werden.

Die in Kapitel 5.2.3 vorgestellte Methodik beschreibt die Möglichkeit zur Bestimmung der zukünftigen Materialströme im Zuge der Wohngebäudeabriss in Bayern. Die statistischen Lücken der Gebäudeverteilung in Bayern vor 1969 konnten mit Hochrechnungen auf Basis der Gebäudedatei der Landeshauptstadt München geschlossen werden. Hier muss ein gewisser Grad an Ungenauigkeit in Kauf genommen werden, da keine anderen Angaben zu den Erstellungsjahren der Gebäude in diesem Zeitraum verfügbar sind. Der Einsatz der Normalverteilung im Modell beschreibt nicht nur einen gängigen mathematischen Umgang mit großen Stichproben, sondern glättet auch die durch die Münchner Daten verursachten Peaks der Gebäudeverteilung. Die pauschalen Annahmen zum Gebäudealter sind kritisch zu hinterfragen. Aus den Ergebnissen wird sichtbar, dass die Stoffströme in den kommenden Jahren exponentiell anwachsen werden. Auch wenn der Höchstwert der Materialmengen mit etwa 24 Mio. Tonnen an freiwerdenden Stoffen voraussichtlich in 20 Jahren erreicht wird (bei einer durchschnittlichen Lebensdauer der Gebäude von 80 Jahren), so wird der Anfall an Rohstoffen bereits in den kommenden Jahren durch den exponentiellen Verlauf des Abrissverhaltens deutlich zunehmen. Eine Validierung der Ergebnisse hinsichtlich der Gebäudeabgänge und der anfallenden Bau- und Abbruchabfälle war aufgrund von unscharfen statistischen Erhebungen der beiden Bereiche nicht möglich. Die Plausibilitätsprüfung ließ die anfallenden Materialmengen jedoch sinnvoll erscheinen (vgl. Kapitel 5.2.5). Beim Umgang mit den Abbruchabfällen spielt das Recycling eine bedeutende Rolle. Dazu konnte festgestellt werden, dass eine kreislaufgerechte Führung der Materialien im Bauwesen derzeit nicht stattfindet. Bei der Weiterverwertung der Sekundärstoffe aus dem Hochbau im Tiefbau kommt es meistens lediglich zum Downcycling. Dabei ließen sich die Anteile an Recyclingstoffen in vielen Bauprodukten deutlich steigern. Erste verfahrenstechnische Ansätze zum Aufbereiten der Bauabfälle existieren bereits und müssen für ein kreislaufgerechtes Wirtschaften mit den Ressourcen weiter ausgebaut werden.

7. Empfehlungen und Handlungshinweise

Bei der Bearbeitung der Forschungsarbeit konnten einige Handlungshinweise für die Stakeholder der Bau – und Abrissindustrie, der statistischen Ämter und der Politik abgeleitet werden. Die folgenden Empfehlungen wurden sowohl der Literaturrecherche als auch den Experteninterviews entnommen:

- Grundsätzlich sollte nach Möglichkeit die Lebensdauer der Gebäude maximal hoch gehalten werden. Die Sanierung der Gebäude sollte, wo sinnvoll, dem Abriss und Neubau vorgezogen werden.
- Zur Erhöhung der Rezyklatanteile in Bauprodukten, insbesondere im Hochbau, sind entsprechende Rahmenbedingungen von der Politik notwendig.
- Aus Sicht der Kreislauffähigkeit ist die Wiederverwendung geeigneter Bauteile und Baustoffe als oberste Priorität anzusetzen. Bauteile und Baustoffe sollten entsprechend konstruiert werden, so dass sie zur Wiederverwendung geeignet sind.
- Es sollte insbesondere die Art von Recycling gestärkt werden, bei der kein Qualitätsverlust der Materialien stattfindet. Bei biotischen Materialien ist eine Kaskadennutzung einer sonstigen Verwertung deutlich vorzuziehen.
- Der Abbruch der Gebäude sollte bereits beim Entwurf und bei der Planung eines Gebäudes berücksichtigt werden. Hierbei können die Cradle-to-Cradle Prinzipien und die Erstellung von Materialpässen nützlich sein. Zudem werden verpflichtende Werkzeuge zur Bewertung der Kreislauffähigkeit beim Neubau für sinnvoll gehalten.
- Konstruktiv sollten die Trennbarkeit und die Sortenreinheit der Bauteile und Baustoffe forciert werden. Dabei sollten einfache Bauweisen mit einer geringen Vielfalt an Baustoffen (wie die monolithische Bauweise) und lösbaren Verbindungen (z.B. Schraubverbindungen) verfolgt werden.
- Der selektive Rückbau, der die sortenreine Trennung der Stoffe begünstigt, sollte zur Norm werden. Auf den konventionellen Abbruch mit der „Abrissbirne“ ist zu verzichten.
- Die bayerischen 3D-Stadtmodelle sollten mit Informationen zum Erstellungsjahr der Gebäude bereichert werden und dem freien Zugriff zur Verfügung stehen.
- Schließlich sollten die Statistiken zu Abbruchtätigkeiten sowie zum Aufkommen der Abbruchmengen differenziert dargestellt werden.

8. Ausblick

Die in dieser Studie beschriebenen erweiterten Methoden bilden eine Basis zur Bestimmung des aktuellen Stoffdepots sowie der abrissbedingten zukünftigen Stoffströme im Wohngebäudebestand Bayerns. Besonders das dynamische Modell sollte weiter ausgebaut werden. So basieren die erwarteten Gebäudelebensdauern auf gängigen Literaturkennwerten. In der Realität kann davon ausgegangen werden, dass die Vorgänge mehr Komplexität aufweisen. Insbesondere besteht die Frage, ob die pauschalen Annahmen zu den erwarteten Lebensdauern zielführend sind. In weiterführenden Studien sollte daher das Alter in Abhängigkeit des Gebäudetyps und seines Erstellungszeitraums anhand von Praxisbeispielen bestimmt werden. Beispielsweise kann das Alter eines Einfamilienhauses aus dem Jahr 1920 von dem eines Mehrfamilienhauses aus den 70er Jahren unterscheiden. Außerdem sollten die in der Wirklichkeit bestehenden Gründe für den Abriss von Gebäuden näher beleuchtet werden. Spielen beispielsweise strukturelle oder wirtschaftliche Gründe, wie die Entwicklung der Immobilienpreise, eine Rolle? Mit diesem Wissen ließen sich ein besseres Verständnis für das System generieren und weitere mögliche Einflussfaktoren herausarbeiten. Gleichzeitig könnten die Einflussgrößen bestimmt werden, mit denen die Gebäudelebensdauer verlängert werden könnte, was ganz im Sinne der Nachhaltigkeit zur Vermeidung von Abfällen führen würde.

Weiterhin weisen die Berechnungen der Studie gewisse Grenzen in Bezug auf das anthropogene Lager und seine Materialströme auf. Die Modelle befassen sich lediglich mit Wohngebäuden, Nichtwohngebäude werden nicht betrachtet. Diese zeigen indessen kürzere Lebenserwartungen, was zu einer höheren Fluktuation der Bauwerke und damit zu einer höheren Dynamik der Stoffströme führt. Oft bestehen Nichtwohngebäude (z.B. Produktionshallen) im Gegensatz zu Wohngebäuden aus einfacheren Konstruktionen. Zudem ist hier mit einem hohen Anteil an wertvollen und gut recyclebaren Metallen zu rechnen. Um das Potenzial dieser Bauten für eine kreislaufgerechte Ressourcenwirtschaft feststellen zu können, besteht die Notwendigkeit Nichtwohngebäude ebenfalls zu untersuchen.

Zum anderen erfassen die dynamischen Modelle die Freisetzung der Baustoffe durch Abriss-, jedoch nicht durch Sanierungsmaßnahmen. Aktuell ist hier mit deutlich geringeren Materialmengen als bei Abbruchtätigkeiten zu rechnen. Bald kann die Sanierungsrate in Deutschland im Zuge der steigenden Energiekosten und der CO₂-Bepreisung der Betriebsenergie anwachsen. Die damit freigesetzten Stoffströme sollten daher nicht vernachlässigt und in weiterführenden Studien geprüft werden.

Daneben zeigten die Berechnungen der Forschungsarbeit einen exponentiellen Anstieg der anfallenden Bauabfallmengen. Die Zunahme der Materialvielfalt stellt eine weitere Problematik für die Aufbereitung der Baustoffe dar. Es sind also dringend Strategien zu überlegen, wie mit diesen Herausforderungen kurz-, mittel- und langfristig nachhaltig verfahren werden soll. Die aktuelle Behandlung der Sekundärrohstoffe aus dem Hochbau, und zwar die Weiterverwertung im Tiefbau, bietet durch den damit einhergehenden Qualitätsverlust der Materialien keine nachhaltige Lösung für einen schonenden Umgang mit den Ressourcen. Eine weitere zentrale

Frage besteht nach dem hochwertigen Aufbereiten der Sekundärrohstoffe in der Baubranche. Wie können Rezyklatanteile in der Hochbaupraxis gesteigert werden und welcher Instrumente bedarf es, damit eine „echte“ Kreislaufwirtschaft realisiert werden kann? Der Handlungsbedarf umfasst nicht nur die technische, sondern auch die gesellschaftliche und die politische Ebene. Die letztere sollte eine entsprechende finanzielle Neubewertung beim Umgang mit Recyclingbaustoffen und –komponenten vornehmen. Zusätzlich spielt die Digitalisierung eine entscheidende Rolle. Einerseits muss der Bestand (besonders semantische Daten) großflächig in digitalen Modellen erfasst werden. Entsprechende Methoden sind zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht bekannt und werden u.a. von Kommunen dringend benötigt. Zum anderen müssen den Planenden entsprechende Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, die mehr Planungssicherheit und die Möglichkeit zum Umdenken der bestehenden Prozesse mit sich bringen. Dies sind beispielsweise Online-Börsen von Sekundärbauteilen und -stoffen, aber auch Simulationstools zur dynamischen Vorhersage von regionalen Stoffströmen. Von diesen Simulationstools würden weitere Akteur:innen wie Abriss- und Aufbereitungsunternehmen sowie potentielle Händler von Recyclingkomponenten profitieren.

Aus der Vielzahl der hier angesprochenen Punkte wird deutlich, dass die Themen Urban Mining und Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht sind. Es besteht großer Forschungs-, Entwicklungs- und Umsetzungsbedarf bis die Materialkreisläufe in der Praxis tatsächlich geschlossen sind.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Die bayerischen Bau-, Baustoff- sowie Garten- und Landschaftsbauverbände, *Positionspapier der bayerischen Bau-, Baustoff- sowie Garten- und Landschaftsbauverbände 2017. Kreislaufwirtschaft am Bau Stärken – Teure Entsorgung vermeiden*, München, 2017.
- [2] J. Hedemann und I. Meinshause, „Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland - Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II).“, ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, Hamburg, 2017.
- [3] H. Elsner, *Sand - Auch in Deutschland bald knapp?*, B. f. G. u. Rohstoffe, Hrsg., Hannover, 2018.
- [4] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, *Deutschland - Rohstoffsituation 2017*, Hannover, 2018.
- [5] M. A. Heinrich, *Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham*, München, Bayern: Technische Universität München, 2018.
- [6] G. Schiller, R. Ortlepp und N. Krauß, „Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft“, Umwelt Bundesamt, Dessau-Roßlau, 2015.
- [7] C. Deilmann, N. Krauß und K. Gruhler, „Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau“, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden, 2014.
- [8] B. Schnitzer und T. Köhler, *Regionale Ressourcenkataster – Urban Mining und Geodateninfrastrukturen*, 2015.
- [9] F. Kleemann, J. Lederer und J. Fellner, „Hochbauten als Wertstoffquelle“, *IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie*, Nr. 3/16, 2016.
- [10] F. Kleemann, J. Lederer, P. Aschenbrenner und J. Fellner, „Gebäude als urbane Mine – Fallstudie Wien“, in *Fachtagung Recycling R´16*, Weimar, 2016.
- [11] H. Daxbeck, H. Buschmann, A. Gassner und A. Kapfenberger-Pock, „Das anthropogene Lager in der Steiermark – Entwicklung eines Urban Mining Katasters. Land Steiermark inklusive Fallstudie Graz. Projekt UMKAT.“, Ressourcen Management Agentur, Wien, 2015.
- [12] H. Daxbeck, H. Buschmann und A. Gassner, „Das anthropogene Lager in der Steiermark – Entwicklung eines Urban Mining Katasters (Projekt UMKAT)“, in *Zukunftsakademie*, 2015.
- [13] S. Markova und H. Rechberger, „Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen“, Technische Universität Wien (TU Wien), Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Fachbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, 2011.
- [14] Bayerische Vermessungsverwaltung, „<https://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html>“, März 2018. [Online].

Available:

https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/6723/Kundeninformation_LoD2.pdf.

- [15] T. Loga, B. Stein, N. Diefanbach und R. Born, „Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.“ Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2015.
- [16] E. Hinz, „Gebäudetypologie Bayern. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns.“ Institut Wohnen und Umwelt, 2006.
- [17] K. Gruhler, R. Böhm, C. Deimann und G. Schiller, „Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe – Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen.“ Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Dresden, 2002.
- [18] K. Gruhler und R. Böhm, „Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes – Deutschland 2050 –“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011.
- [19] Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., „<http://ioer-bdat.de/>“, [Online]. Available: <http://ioer-bdat.de/bauwerksdaten/wohngebaeude/>. [Zugriff am 05. Januar 2022].
- [20] K. Gruhler, Interviewee, *Austausch zu Wohngebäudetypologien des Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V.*. [Interview]. 31. August 2021.
- [21] U. P. Böhme, Wärmeverbrauchsanalyse auf Basis einer raumbezogenen Zusammenführung von Gebäudedaten, München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2013.
- [22] K. Elbel, M. Hoppe, M. Lindauer, P. Schneider, M. Windeknecht und I. Nemeth, „Energetische Gebäudesanierung in Bayern“, Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. , München, 2012.
- [23] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, Mai 2014. [Online]. Available: https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/f0111c_201451_23085.pdf. [Zugriff am Mai 2021].
- [24] L. Messari-Becker, Ingenieurbaukunst 2021 - Made in Germany, Bundesingenieurkammer, Hrsg., Ernst & Sohn, 2020.
- [25] Bayerisches Landesamt für Statistik, *Bevölkerungsstatistischer Quartalsbericht*, Fürth, 2022.
- [26] Prognos AG, „Constructing Our Future. Planen. Bauen. Leben. Arbeiten. Eine vbw Studie mit Beiträgen von Prognos, Fraunhofer IAO und Leonhard Obermeyer Center“, vbw Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. , München, 2021.
- [27] B. Mahler, S. Idler und J. Gantner, „Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2019.
- [28] „Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, 2020.
- [29] C. Bahr und K. Lennerts, „Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2010.

- [30] M. Pfeiffer, *Lebensdauer von Bauteilen*, 2019.
- [31] Pfeiffer, Bethe, Fanslau-Görlitz und Zedler, *Nutzungsdauertabellen für Wohngebäude*, Berlin: Bauwek Verlag , 2010.
- [32] M. Huhn, „Die Gesamtnutzungsdauer in der Immobilienwertermittlung: Eine Analyse der Einflussfaktoren,“ Technische Universität Darmstadt, Darmstadt , 2019.
- [33] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*, Berlin, 2017.
- [34] Landeshauptstadt München, „<https://stadt.muenchen.de>,“ [Online]. Available: <https://stadt.muenchen.de/rathaus/verwaltung/referat-stadtplanung-bauordnung.html>. [Zugriff am 13 November 2021].
- [35] Bayerisches Landesamt für Statistik , „<https://www.statistikdaten.bayern.de>,“ [Online]. Available: <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/>. [Zugriff am 13 November 2021].
- [36] E. Nemeth, *Methodenentwicklung zur Bestimmung von Potenzialen der Energieeffizienzsteigerung im Haushalts- und GHD-Sektor - Am Beispiel von drei Landkreisen in Bayern -*, München: Technische Universität München, 2010.
- [37] I. Sartori, H. Bergsdal, D. Müller und H. Brattebo, „Towards modelling of construction, Towards modelling of construction, Norway’s dwelling stock, 1900 - 2100,“ *BUILDING RESEARCH & INFORMATION*, 14. 08. 2008.
- [38] Bayerisches Landesamt für Statistik, „2 422 Gebäude und Gebäudeteile mit 2 629 Wohnungen aus dem Bestand in Bayern 2020 abgegangen,“ Fürth, 2021.
- [39] Bayerisches Landesamt für Statistik , *Zur Verwertung und Beseitigung eingesetzte Bauabfälle in Bayern nach Abfallarten*, Fürth, 2020.
- [40] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) - § 3 Begriffsbestimmungen*.
- [41] A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen und J.-K. Seggewies, *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München: DETAIL, 2018.
- [42] Kreislaufwirtschaft Bau, „Mineralische Bauabfälle - Monitoring 2018 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018,“ Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. , Berlin, 2021.
- [43] O. Krauß und T. Werner, „Kurzanalyse Nr. 8: Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich,“ VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 2016.
- [44] C. Deilmann, J. Reichenbach, N. Krauß und K. Gruhler, „Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft,“ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn , 2016.
- [45] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, „<https://www.ibp.fraunhofer.de>,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/mwb/produktblatt-fragmentierung.pdf>. [Zugriff am 13 Januar 2022].

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialgruppen der Wohngebäudetypologie des IÖR, eigene Darstellung nach [18] und [19].	21
Tabelle 2: Anzahl der Wohngebäudeabgänge in den Jahren 2018 - 2020 nach eigenen Berechnungen und nach der Bayerischen Statistik [38].....	41
Tabelle 3: Übersicht der Recycling-Begriffe, nach [40] und [41].	43
Tabelle 4: Materialübersicht der Gebäudetypologien nach IÖR, [19]	56
Tabelle 5: Fragenkatalog der Experteninterviews	58
Tabelle 6: Antwortenmatrix der Experteninterviews	58
Tabelle 7: Zukünftig anfallende Stoffmengen nach Szenario 1 in Tonnen.....	60

Anhang A

Tabelle 4: Materialübersicht der Gebäudetypologien nach IÖR, [19]

Baumaterialgruppen	Unterkategorie
Beton	Standardbeton, Leichtbeton
Ziegel	Ziegelsteine, Ziegeldeckungen
Asbest	Asbestzementplatten, asbesthaltige Dachdeckungen
sonst. Mineralisches	Kalkhaltige Putze, Mörtel, gips-/anhydrithaltige Putze, ton-/lehmhaltige Putze, Putze, Mörtel mit synthetischen Anteilen, kalkhaltige Estriche, gips-/anhydrithaltige Estriche, Trockenestriche (gips-/anhydrithaltig), Estriche mit synthetischen Anteilen, Kalksandsteine, Porenbetonsteine, Betonsteine, Lehmstein, Gips-/ Gipskartonplatten, mineralische Bauplatten, mineralische Wärmedämmstoffe, Betondachsteindeckungen, Faserzementdeckungen, Schieferdeckungen, Substratschichten („Gründach“), mineralische Schüttungen, Glas, Natursteine, sonstige mineralische Baustoffe
Holz	Schnittholz, verarbeitetes Holz
sonst. Nachwachsendes [t]	Nachwachsende Wärmedämmstoffe, Stroh-/ Schilfdeckungen, sonstige nicht mineralische Baustoffe

Kunststoffe [t]	erdölbasierte Wärmedämmstoffe, Kunststoffdachdeckungen, erdölbasierte Beläge, Dichtungsbahnen
Bitumenhaltiges [t]	Bitumendachdeckungen, bitumenhaltige Beläge, Dichtungsbahnen
Eisenmetalle [t]	Metalldachdeckungen, Eisenmetalle
Nichteisenmetalle [t]	aluminiumhaltige Beläge, Dichtungsbahnen, Aluminium, Kupfer, sonstige Nichteisenmetalle

Anhang B

Tabelle 5: Fragenkatalog der Experteninterviews

Fragen
1. Welche Arten von Gebäude werden vorwiegend abgerissen? Wohn- und Nicht-Wohngebäudeanteilig? 2. Aus welchen Gründen werden die Wohngebäude abgerissen (falls bekannt)? 3. Wohngebäude: Welche typischen Baualtersklassen werden abgerissen? Anteilig? 4. Wie sehen die Fraktionen aus? 5. Was passiert mit den einzelnen Fraktionen nach dem Abriss? 6. Welche Recyclingfähigkeit weisen die einzelnen Fraktionen heute auf? 7. Wie wird sich die Recyclingfähigkeit in der Zukunft verändern? 8. Wie lässt sich recyclinggerecht Planen und Bauen?

Tabelle 6: Antwortenmatrix der Experteninterviews

	Experte #1	Experte #2	Experte #3
1	Wohnen: Gewerbe = 30 : 70 %	Wohn << 50 %	Kein Angaben
2	Umnutzung, Umbaukosten > Abriss- & Neubaukosten -> Abriss	Nachverdichtung, Folgenutzung, beschädigte Bausubstanz	Keine Angaben
3	Großteil: 1975 – 2000er Jahre -> keine Daten, da kein Interesse	Unterschiedlich, je nach Region. Abriss: 50 Jahre alte Gebäude & älter.	Keine Angaben
4	Mineralik, Dämmstoffe, Gips/ Estrich, Metalle, Kunststoffe, Glas	Bauschutt, Rigips, Altholz, Glas, Metalle Dachpappe, Baumischabfälle, Dämmung	Bauschutt, Beton, Gips/Rigips, Ziegel, Porenbeton, Holz, Dämmung, Kunststoffe

5	Beton & Bauschutt: 60 – 70% recycelt, 20 – 30 % wiederverwertet, geringe Mengen werden beseitigt.	Bauschutt = Recycling. Altholz = thermische Verwertung. Erdreich = Deponie + Verfüllung.	Aufbereitung -> Recycling, Verfüllung, Deponie
6	Beton: 90 %. Bauschutt: 60 – 70 %. Bodenaushub sehr schwankend.	Bauschutt: => 90 %. Nicht verwertbarer Anteil ca. 5 %.	Recycling aller Fraktionen mit erfüllter Anforderung RW1, keine konkreten Zahlen
7	Es wird schwieriger	Schwieriger, da feste Verbindungen	Es wird schwieriger
8	Monolithisch bauen, lösbare Verbindungen, Cradle-2-Cradle	Gesamten Lebenszyklus + Kosten mitdenken	Monolithisch bauen.

Anhang C

Tabelle 7: Zukünftig anfallende Stoffmengen nach Szenario 1 in Tonnen

	Standardbeton	Leichtbeton	Ziegelsteine	Ziegelsteine mit Dämmung	Ziegeldeckung	Asbestzementplatten
2018	727742,8002	2664,747	612889,1	0	17907,99	3,602689
2019	848046,0095	3875,779	688879	0	20355,91	5,239983
2020	995319,1911	5541,81	776870,6	0	23237,01	7,492427
2021	1173157,114	7788,316	876345,4	0	26563,56	10,52966
2022	1385036,824	10756,29	986226,7	0	30333,35	14,54231
2023	1634204,393	14596,08	1104940	0	34529,79	19,73364
2024	1923541,657	19458,32	1230540	0	39123,25	26,3073
2025	2255395,754	25481,57	1360879	0	44073,15	34,45062
2026	2631343,515	32777,41	1493796	0	49330,02	44,31446
2027	3051885,878	41414,02	1627267	0	54836,63	55,991
2028	3516108,458	51400,2	1759529	0	60528,04	69,49214
2029	4021330,311	62671,98	1889106	0	66330	84,73135
2030	4562843,586	75084,38	2014817	0	72157,63	101,5127
2031	5133726,026	88409,87	2135637	0	77911,96	119,5284
2032	5724923,279	102345	2250623	0	83480,29	138,3683
2033	6325518,042	116525,7	2358794	0	88737,42	157,54
2034	6923258,226	130548,8	2459055	0	93550,5	176,4985
2035	7505253,599	143999,5	2550182	0	97786,79	194,6827
2036	8058786,571	156479,1	2630868	0	101323,9	211,5533
2037	8572101,625	167631,1	2699813	0	104060,9	226,6281
2038	9035069,777	177161,7	2755847	0	105928,6	239,5092
2039	9439645,464	184852,4	2798048	0	106896,9	249,9004
2040	9780067,867	190564,3	2825822	0	106978,6	257,6127
2041	10052833,31	194234,2	2838956	0	106227,7	262,5591
2042	10256485,38	195865	2837610	0	104734,5	264,7414
2043	10391308,77	195513,1	2822275	0	102615,5	264,2327
2044	10459032,29	193274,4	2793719	0	100003,4	261,1595
2045	10462575,58	189274	2752915	0	97034,94	255,6863
2046	10405916,55	183657,4	2700996	0	93841,61	248,0051
2047	10294029,15	176587	2639217	0	90541,68	238,3296
2048	10132862,38	168239,8	2568939	0	87235,46	226,8935
2049	9929301,324	158808,1	2491615	0	84003,15	213,9509
2050	9691054,9	148498,8	2408781	0	80905,09	199,7762
2051	9426436,17	137531,9	2322025	0	77983,51	184,6629
2052	9144046,558	126136,5	2232955	0	75265,39	168,9187
2053	8852373,928	114544,8	2143144	0	72765,52	152,8579
2054	8559381,849	102984,2	2054073	0	70489,71	136,7914
2055	8272131,086	91668,14	1967077	0	68437,7	121,0151
2056	7996513,637	80788,35	1883306	0	66605,99	105,7985
2057	7737097,964	70507,09	1803702	0	64990,07	91,3754
2058	7497128,955	60952,3	1728993	0	63586,49	77,93587
2059	7278614,352	52214,82	1659693	0	62393,65	65,62201
2060	7082628,604	44348,13	1596224	0	61415,43	54,52645
2061	6909342,513	37370,46	1538768	0	60655,92	44,6938
2062	6758402,765	31268,63	1487440	0	60122,57	36,12452
2063	6629031,776	26003,32	1442246	0	59822,77	28,78057
2064	6520125,007	21515,05	1403101	0	59761,21	22,59252
2065	6430267,576	17730,56	1369809	0	59936,79	17,46715
2066	6357694,647	14568,85	1342059	0	60339,58	13,29526
2067	6300215,594	11946,63	1319403	0	60948,18	9,959021
2068	6255062,875	9781,203	1301220	0	61727,18	7,336273
2069	6219206,001	8001,709	1286823	0	62631,44	5,316584
2070	6188744,593	6538,037	1275280	0	63599,22	3,787364
2071	6159433,318	5331,868	1265573	0	64560,51	2,650119
2072	6126840,285	4337,242	1256638	0	65441,01	1,822599
2073	6086240,536	3513,748	1247321	0	66162,54	1,230887
2074	6033081,574	2830,702	1236500	0	66650,87	0,816183
2075	5963115,055	2263,849	1223108	0	66838,94	0,531194
2076	5872618,361	1794,303	1206182	0	66670,57	0,339245
2077	5758476,164	1405,643	1184880	0	66102,43	0,210557
2078	5618654,74	1089,238	1158599	0	65108,08	0,129354
2079	5451689,098	832,738	1126849	0	63674,15	0,077952
2080	5257138,52	627,2929	1089370	0	61802,98	0,045996

	ton-/ lehmhaltige Putze, Mörtel	Putze, Mörtel mit synthetischen Anteilen	kalkhaltige Estriche	gips/ anhydrithaltige Estriche	Trockenestrich (gips-/ anhydritartig)	Estriche mit synthetischen Anteilen
2018	0	0	101941,9332	18045,97851	0	0
2019	0	0	116681,2575	21112,02113	0	0
2020	0	0	134254,9315	24884,69924	0	0
2021	0	0	154860,8781	29466,74037	0	0
2022	0	0	178637,3791	34960,38048	0	0
2023	0	0	205660,9445	41464,28569	0	0
2024	0	0	235948,709	49069,67771	0	0
2025	0	0	269462,9283	57855,20414	0	0
2026	0	0	306112,3954	67879,91411	0	0
2027	0	0	345747,4268	79174,30419	0	0
2028	0	0	388148,5276	91730,55004	0	0
2029	0	0	433007,4174	105492,5768	0	0
2030	0	0	479910,0789	120348,6	0	0
2031	0	0	528313,5979	136126,1446	0	0
2032	0	0	577545,013	152593,7059	0	0
2033	0	0	626808,4024	169467,6124	0	0
2034	0	0	675214,019	186425,436	0	0
2035	0	0	721822,8617	203123,5485	0	0
2036	0	0	765705,0434	219217,3726	0	0
2037	0	0	806000,8225	234380,8721	0	0
2038	0	0	841975,5897	248322,7916	0	0
2039	0	0	873060,7784	260797,7407	0	0
2040	0	0	898874,4654	271611,1958	0	0
2041	0	0	919222,8372	280619,5432	0	0
2042	0	0	934084,4264	287726,0823	0	0
2043	0	0	943583,4334	292875,995	0	0
2044	0	0	947961,9671	296052,2736	0	0
2045	0	0	947553,063	297273,3084	0	0
2046	0	0	942763,6466	296593,7694	0	0
2047	0	0	934062,9287	294106,8741	0	0
2048	0	0	921975,3815	289946,7614	0	0
2049	0	0	907073,841	284289,2159	0	0
2050	0	0	889968,537	277349,1245	0	0
2051	0	0	871289,2611	269373,8625	0	0
2052	0	0	851661,6399	260633,1979	0	0
2053	0	0	831677,8689	251406,2108	0	0
2054	0	0	811868,3248	241967,7253	0	0
2055	0	0	792676,9924	232575,5015	0	0
2056	0	0	774447,3635	223460,6376	0	0
2057	0	0	757417,5976	214820,9667	0	0
2058	0	0	741728,6958	206818,7833	0	0
2059	0	0	727437,253	199580,8445	0	0
2060	0	0	714553,6034	193203,7179	0	0
2061	0	0	703035,236	187752,304	0	0
2062	0	0	692829,5219	183266,808	0	0
2063	0	0	683876,9116	179762,5334	0	0
2064	0	0	676114,9025	177229,7837	0	0
2065	0	0	669473,0785	175632,103	0	0
2066	0	0	663862,1919	174903,8593	0	0
2067	0	0	659159,7558	174948,013	0	0
2068	0	0	655189,2098	175633,2261	0	0
2069	0	0	651743,0472	176804,8429	0	0
2070	0	0	648522,3664	178272,5591	0	0
2071	0	0	645182,5277	179829,4159	0	0
2072	0	0	641346,873	181261,564	0	0
2073	0	0	636596,9571	182351,1443	0	0
2074	0	0	630517,3513	182893,9308	0	0
2075	0	0	622710,3683	182707,1123	0	0
2076	0	0	612819,3956	181638,2724	0	0
2077	0	0	600540,0916	179568,8687	0	0
2078	0	0	585665,5374	176427,9495	0	0
2079	0	0	568044,7329	172175,6326	0	0
2080	0	0	547624,9909	166814,2798	0	0

	Lehm- steine	Gips-/Gipskarton- platten	mineralische Bauplatten	mineralische Wärmedämmstoffe	Betondachstein- deckung	Fasermement- deckung
2018	0	1761,660598	318,4408894	10484,10496	11607,98381	0
2019	0	2031,459175	445,2436734	12215,89898	13253,2128	0
2020	0	2356,190311	618,1202063	14341,85381	15196,47495	0
2021	0	2741,472003	849,454662	16913,83766	17452,66155	0
2022	0	3192,261098	1153,116616	19982,2076	20027,77199	0
2023	0	3712,820335	1543,862021	23593,95115	22918,80322	0
2024	0	4306,739052	2036,450321	27790,51056	26114,33827	0
2025	0	4977,001499	2644,4475	32604,99992	29595,67023	0
2026	0	5725,973963	3378,777673	38058,47127	33337,75964	0
2027	0	6555,263395	4246,119177	44155,16623	37309,62087	0
2028	0	7465,471836	5247,346521	50877,30811	41473,9814	0
2029	0	8455,798429	6376,242175	58179,74387	45785,95671	0
2030	0	9523,628717	7618,62925	65986,37219	50191,84445	0
2031	0	10664,02568	8952,246374	74187,21039	54626,93458	0
2032	0	11869,53504	10347,40176	82640,18855	59015,65351	0
2033	0	13130,05857	11768,43059	91175,61245	63272,56393	0
2034	0	14433,06886	13175,88119	99604,62571	67305,80883	0
2035	0	15763,97394	14529,14065	107730,3516	71022,45225	0
2036	0	17106,70397	15789,25297	115360,6853	74335,45663	0
2037	0	18444,31408	16921,52321	122320,7478	77171,10326	0
2038	0	19759,53456	17897,59609	128463,3281	79475,711	0
2039	0	21035,2138	18696,81459	133675,9449	81220,49811	0
2040	0	22254,6287	19306,75347	137883,7438	82403,68125	0
2041	0	23401,79336	19722,95679	141048,5603	83049,64209	0
2042	0	24461,70914	19948,25097	143164,6937	83205,16096	0
2043	0	25420,83839	19991,56404	144253,0163	82933,62165	0
2044	0	26267,7501	19866,78487	144354,8428	82308,20365	0
2045	0	26993,84498	19591,72923	143526,4773	81404,86254	0
2046	0	27594,27418	19187,34341	141835,6948	80296,51206	0
2047	0	28068,69892	18677,11931	139359,7284	79048,44992	0
2048	0	28421,74793	18086,61158	136184,5538	77715,57027	0
2049	0	28663,04988	17442,90575	132404,6613	76341,10226	0
2050	0	28806,74412	16773,88485	128122,5193	74956,61496	0
2051	0	28870,48317	16107,19969	123447,1002	73582,83246	0
2052	0	28874,13848	15468,94081	118491,3709	72231,04121	0
2053	0	28838,27138	14882,09065	113368,6724	70904,63385	0
2054	0	28782,77574	14364,93592	108188,7214	69600,88803	0
2055	0	28725,75843	13929,64373	103053,6281	68312,77092	0
2056	0	28682,98934	13581,23313	98054,78515	67030,9512	0
2057	0	28667,71203	13317,10081	93270,65613	65745,74145	0
2058	0	28690,99656	13127,23018	88765,93451	64449,06543	0
2059	0	28762,21079	12995,08049	84591,36849	63135,75694	0
2060	0	28889,88545	12899,10475	80786,25512	61806,78665	0
2061	0	29081,54126	12814,706	77376,87464	60466,54445	0
2062	0	29344,1733	12716,4814	74379,98442	59125,58684	0
2063	0	29683,55171	12580,45638	71802,74153	57798,8835	0
2064	0	30103,30438	12386,12834	69643,06766	56504,41612	0
2065	0	30603,64073	12118,09662	67889,4717	55261,2095	0
2066	0	31179,97399	11767,14723	66520,65239	54087,14617	0
2067	0	31821,69816	11330,70431	65505,05958	52996,75937	0
2068	0	32511,25621	10812,48717	64799,66518	51998,6047	0
2069	0	33224,66208	10222,55008	64355,63381	51097,14641	0
2070	0	33930,97274	9574,748935	64110,45215	50286,16462	0
2071	0	34594,50684	8886,242931	63996,35829	49552,73701	0
2072	0	35176,9063	8175,925228	63943,10191	48877,91629	0
2073	0	35639,00613	7462,237718	63876,50549	48234,81643	0
2074	0	35943,85525	6762,333195	63725,11682	47592,36544	0
2075	0	36058,91084	6090,815764	63421,8365	46916,17545	0
2076	0	35958,02406	5459,076873	62906,77789	46170,50299	0
2077	0	35622,5453	4874,811316	62128,24897	45319,63548	0
2078	0	35042,95921	4342,705282	61049,08514	44332,08035	0
2079	0	34217,30439	3863,669004	59639,79926	43178,61414	0
2080	0	33151,84233	3436,168995	57884,84183	41836,66492	0

	Glas	Natursteine	sonstige mineralische Baustoffe	Schnittholz	verarbeitetes Holz	nachwachsende Wärmedämmstoffe
2018	3039,652751	164587,2032	414,2665783	58844,38369	1565,274124	1447,152077
2019	3486,029748	186818,9782	498,7625659	66942,007	1795,510751	1653,169586
2020	4021,214531	212960,0114	605,931146	76510,67972	2070,087334	1897,077605
2021	4652,350348	243068,3707	740,1650955	87599,0255	2392,497091	2181,213298
2022	5385,063901	277055,4493	906,13773	100210,1893	2765,375957	2507,047619
2023	6223,341065	314681,575	1108,636681	114301,1255	3190,506452	2875,275931
2024	7169,503568	355563,2779	1352,331364	129785,8239	3668,898308	3286,01128
2025	8224,199349	399187,2648	1641,465138	146541,0181	4200,936529	3739,080999
2026	9386,271665	444924,082	1979,464563	164411,399	4786,484587	4234,30394
2027	10652,41563	492034,9245	2368,482663	183212,0114	5424,891601	4771,688691
2028	12016,6521	539668,2363	2808,935025	202726,9662	6114,902122	5351,533309
2029	13469,59827	586844,1556	3299,07288	222703,0837	6854,408792	5974,333101
2030	14997,87977	632447,387	3834,68502	242845,7519	7640,206053	6640,617355
2031	16583,38625	675199,1147	4408,956329	262806,2205	8467,574271	7350,275889
2032	18203,29889	713678,5464	5012,602912	282184,8594	9330,134167	8103,513238
2033	19830,42495	746356,697	5634,233436	300536,5677	10219,73872	8897,95208
2034	21434,24858	771671,3327	6260,962882	317389,1103	11126,6378	9730,878384
2035	22982,48078	788137,5745	6879,174288	332212,5827	12039,79953	10597,78396
2036	24443,01635	794484,4804	7475,362565	344751,2522	12947,41632	11492,5488
2037	25785,94444	789799,7201	8036,923047	354472,9347	13837,44918	12407,42933
2038	26985,33086	773659,6115	8552,788521	361194,7972	14698,13307	13333,10286
2039	28020,5211	746221,9945	9013,848469	364814,4699	15518,36292	14258,75263
2040	28876,78275	708262,348	9413,123545	365380,3679	16287,9172	15172,19717
2041	29545,35099	661144,7358	9745,73616	363087,0937	16997,58469	16060,14845
2042	30022,92072	606726,1446	10008,73428	358254,1923	17639,15745	16908,55157
2043	30310,86005	547207,742	10200,8637	351293,4989	18205,49429	17703,1482
2044	30414,41342	484953,3666	10322,37651	342669,978	18690,64896	18430,20848
2045	30341,97397	422297,2377	10374,90313	332860,7647	19090,06171	19077,33983
2046	30104,69506	361369,6367	10361,44205	322320,2197	19400,9172	19634,4007
2047	29716,29506	303956,9642	10286,40215	311452,361	19622,46876	20094,26481
2048	29192,99825	251412,3129	10155,64372	300593,7506	19756,2968	20453,35573
2049	28553,46111	204619,0622	9976,456442	290006,2014	19806,39955	20711,8476
2050	27818,53183	164004,7979	9757,413809	279877,9271	19779,05965	20873,48887
2051	27010,7475	129595,2541	9508,075528	270330,6037	19682,4685	20945,06855
2052	26153,58796	101094,8414	9238,564375	261430,4072	19526,20398	20935,6677
2053	25270,50145	77979,2817	8959,03626	253200,1177	19320,58003	20855,76176
2054	24383,89827	59587,21541	8679,144755	245631,7206	19076,06683	20716,41568
2055	23514,21216	45201,44843	8407,547333	238697,963	18802,81335	20528,62874
2056	22679,23974	34113,40278	8151,554053	232363,3062	18510,42171	20302,99691
2057	21893,72741	25668,62525	7916,90946	226592,7979	18207,8866	20049,59272
2058	21169,33283	19294,0191	7707,76637	221359,7575	17903,74429	19778,10974
2059	20514,71348	14503,38597	7526,775453	216648,9576	17606,24252	19498,04694
2060	19936,363	10924,57793	7375,342996	212469,1024	17323,80185	19219,17257
2061	19438,15059	8244,418318	7253,764882	208835,5323	17064,62429	18951,15985
2062	19022,33045	6233,685768	7161,541278	205780,7189	16836,98827	18703,83349
2063	18689,42934	4721,467788	7097,492782	203343,0871	16648,7477	18486,61793
2064	18438,21702	3582,328823	7059,840182	201558,5223	16506,80173	18307,92374
2065	18265,48807	2724,608412	7046,194631	200450,1814	16416,40712	18174,3654
2066	18165,7581	2081,268938	7053,491611	200018,4129	16380,45735	18089,94982
2067	18130,95478	1602,427586	7077,901745	200231,8535	16398,83131	18055,35773
2068	18150,00048	1241,220257	7114,696658	201017,8622	16467,81781	18067,35864
2069	18209,88799	991,5861217	7158,587848	202275,9109	16580,42918	18119,04008
2070	18294,12874	814,2549168	7203,249088	203851,6295	16725,62141	18199,26213
2071	18384,63473	687,1608026	7241,940323	205562,3339	16889,35592	18293,69843
2072	18462,56141	607,6134825	7267,81987	207207,0773	17055,31815	18385,68173
2073	18508,36913	555,5506056	7274,028477	208564,1838	17205,35838	18456,86979
2074	18503,55425	522,2167569	7254,297287	209414,7597	17320,83846	18488,65524
2075	18431,32775	500,6075591	7203,214239	209550,9578	17383,48862	18463,14231
2076	18277,47041	485,3953858	7116,528887	208787,1615	17376,36147	18364,15309
2077	18030,6855	472,4539306	6991,255745	206966,6564	17284,47237	18177,85739
2078	17683,97127	459,7918055	6826,123291	203976,4107	17096,10501	17894,05389
2079	17233,08224	445,4114141	6620,954945	199736,8044	16802,18883	17505,38822
2080	16677,68939	428,4849369	6377,009482	194213,5059	16397,41309	17008,36972

	Kunststoff- dachdeckung	erdölbasierte Beläge, Dichtungs- bahnen	Bitumendach- deckung	bitumenhaltige Beläge, Dichtungs- bahnen	Metalldach- deckung	Eisenmetalle	Aluminium- haltige Beläge, Dichtungsbahnen
2018	78,97619322	1840,200141	1861,090397	0	0	83385,4866	0
2019	90,24232933	2133,292774	2164,267707	0	0	96725,42597	0
2020	103,5949123	2489,061398	2535,498004	0	0	112943,2797	0
2021	119,1736702	2915,058333	2983,662278	0	0	132388,2125	0
2022	137,0772001	3418,394712	3517,386703	0	0	155387,0148	0
2023	157,3705582	4005,622622	4144,768585	0	0	182234,6514	0
2024	180,0988471	4682,629384	4873,048684	0	0	213184,0053	0
2025	205,3073664	5454,530986	5708,159488	0	0	248432,7462	0
2026	233,0607442	6325,444755	6654,103	0	0	288103,9143	0
2027	263,4575558	7298,10678	7712,140673	0	0	332219,0928	0
2028	296,6393709	8373,389195	8879,891434	0	0	380667,2548	0
2029	332,7875696	9549,694542	10150,40365	0	0	433171,0947	0
2030	372,1141049	10822,41846	11511,47544	0	0	489260,2822	0
2031	414,8345808	12183,39931	12945,1693	0	0	548251,4776	0
2032	461,1441576	13620,80322	14427,99661	0	0	609253,1588	0
2033	511,1827009	15119,19866	15931,60503	0	0	671188,9015	0
2034	565,0035356	16660,0734	17424,10615	0	0	732846,5392	0
2035	622,5399947	18222,57047	18871,84389	0	0	792944,4229	0
2036	683,5779711	19784,4629	20241,43247	0	0	850210,1206	0
2037	747,7315336	21323,11276	21501,74255	0	0	903457,9027	0
2038	814,4252562	22816,30032	22625,57374	0	0	951654,7923	0
2039	882,8856541	24242,83687	23590,8064	0	0	993966,9431	0
2040	952,1448891	25582,92844	24380,91526	0	0	1029781,223	0
2041	1021,063305	26818,4203	24984,92144	0	0,004360729	1058704,859	0
2042	1088,369791	27932,95761	25396,9053	0	0,013978042	1080547,6	0
2043	1152,72395	28912,28595	25615,29544	0	0,033157942	1095294,597	0
2044	1212,795976	29744,76089	25642,21272	0	0,070424742	1103080,988	0
2045	1267,353549	30421,98709	25482,95956	0	0,138016978	1104170,582	0
2046	1315,352473	30939,68537	25145,81373	0	0,256405774	1098946,509	0
2047	1356,011105	31298,44968	24642,02929	0	0,461049272	1087908,015	0
2048	1388,860946	31504,24152	23985,94968	0	0,807991987	1071669,877	0
2049	1413,765015	31568,45128	23195,06991	0	1,383927733	1050958,304	0
2050	1430,901626	31507,40964	22289,89286	0	2,31895985	1026597,565	0
2051	1440,716531	31341,3404	21293,48312	0	3,802573835	999484,0703	0
2052	1443,855034	31092,94066	20230,70474	0	6,105508752	970549,5182	0
2053	1441,081954	30785,68288	19127,19118	0	9,600534443	940714,6669	0
2054	1433,207586	30442,22644	18008,18608	0	14,78723881	910842,3487	0
2055	1421,026545	30083,06296	16897,39382	0	22,31075985	881694,5011	0
2056	1405,281389	29725,71394	15816,00387	0	32,98008342	853902,0915	0
2057	1386,647119	29384,36736	14781,95787	0	47,76639423	827947,7015	0
2058	1365,738133	29070,09694	13809,54657	0	67,79314037	804165,7315	0
2059	1343,125345	28791,33218	12909,24976	0	94,29627313	782752,2402	0
2060	1319,373546	28554,84957	12088,16914	0	128,5602153	763799,8177	0
2061	1295,036604	28365,86935	11349,89727	0	171,8221348	747300,6774	0
2062	1270,687496	28228,93495	10695,35803	0	225,1558603	733190,1485	0
2063	1246,903145	28147,75076	10123,14261	0	289,329607	721358,1163	0
2064	1224,243616	28124,8556	9629,967259	0	364,6611524	711660,1575	0
2065	1203,218128	28160,9445	9211,056369	0	450,8824374	703919,5184	0
2066	1184,244564	28254,0132	8860,458709	0	547,033981	697922,6394	0
2067	1167,608471	28398,4953	8571,288018	0	651,4084759	693410,5994	0
2068	1153,423458	28584,42991	8335,723858	0	761,5594691	690062,7567	0
2069	1141,630282	28797,95395	8146,082679	0	874,3842649	687529,3129	0
2070	1131,948737	29020,10195	7993,417822	0	986,2808298	685368,4871	0
2071	1123,912559	29228,4643	7868,819293	0	1093,367921	683102,5398	0
2072	1116,892157	29398,33681	7763,629165	0	1191,747708	680236,2451	0
2073	1110,108745	29503,47977	7668,889816	0	1277,782744	676248,2677	0
2074	1102,692693	29518,24292	7576,150806	0	1348,355773	670642,2397	0
2075	1093,723905	29418,89265	7477,429939	0	1401,082458	662962,6921	0
2076	1082,282453	29185,01279	7365,44436	0	1434,453471	652819,7177	0
2077	1067,484503	28800,28909	7233,567842	0	1447,89253	639897,8779	0
2078	1048,575208	28254,29275	7076,867953	0	1441,728939	624005,8121	0
2079	1024,888301	27541,00185	6890,782024	0	1417,094948	605020,2092	0
2080	995,9384396	26660,14177	6672,296037	0	1375,767521	582931,8925	0