

# Leitfaden RessourcenPlan



## Teil 2: Elemente des RessourcenPlans

### 2.3: Ressourcenmanagement Baustoffe

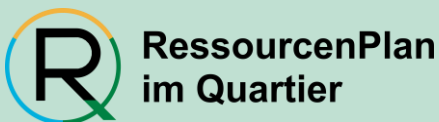


**FONA**  
Forschung für Nachhaltigkeit

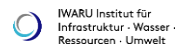
Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

**RESIZ**  
Ressourceneffiziente  
Stadtquartiere

## Ergebnisse des Projekts



Februar 2023



Jung Stadt Konzepte



## Impressum

### Autoren und beteiligte Institutionen

Autoren	Institution
<b>Celestin J. Stretz, Marie L. Nießen, Gotthard Walter, Sabine Flamme</b>	FH Münster, IWARU, Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt

### Herausgeber

FH Münster  
IWARU Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt  
Corrensstraße 25  
48149 Münster

### Ansprechpartner

Celestin Stretz  
FH Münster  
IWARU Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt  
Mail: [c.stretz@fh-muenster.de](mailto:c.stretz@fh-muenster.de)

### Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes R2Q „RessourcenPlan im Quartier“ durchgeführt. Das Projekt wurde unter den Förderkennzeichen 033W102A-K durch das BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung RES:Z „Ressourceneffiziente Stadtquartiere“ gefördert (<https://ressourceneffiziente-stadtquartiere.de/>). Die Fördermaßnahme ist Teil der Leitinitiative Zukunftsstadt innerhalb des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung – FONA<sup>3</sup>“.

### Verfügbarkeit und Verwendung

Dieses Dokument ist Teil der Publikationsreihe „Leitfaden RessourcenPlan“. Sie ist online verfügbar unter [www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan](http://www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan).

Bitte zitieren als:

Stretz, C.J., Nießen, M.L., Walter, G., Flamme, S. (2023): *Leitfaden RessourcenPlan – Teil 2.3: Ressourcenmanagement Baustoffe. Ergebnisse des Projekts R2Q RessourcenPlan im Quartier*. Münster: FH Münster, IWARU Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt. doi: [10.25974/fhms-15755](https://doi.org/10.25974/fhms-15755).



Dieses Dokument ist unter einer Open Access Creative Commons CC BY 4.0-Lizenz lizenziert ([Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)). Das bedeutet, dass das Dokument kostenlos heruntergeladen und gelesen werden kann. Darüber hinaus darf das Dokument wiederverwendet und zitiert werden, sofern die veröffentlichte Originalversion zitiert wird.

Münster, Februar 2023

## Hinweis: Struktur des „Leitfaden RessourcenPlan“

Der „Leitfaden RessourcenPlan“ dient der anwendergerechten Darstellung der Ergebnisse des BMBF-Projekts „RessourcenPlan im Quartier (R2Q)“. Der Leitfaden

- *definiert den RessourcenPlan* als neuen Planungsansatz für das Ressourcenmanagement im Quartier inklusive seiner Anwendungs- und Bewertungsroutinen;
- diskutiert darauf aufbauend einzelne *Elemente des Ressourcenmanagements* für die Schwerpunkte (i) Wasser, (ii) Baustoffe, (iii) Energie und (iv) Fläche und
- stellt ergänzende *Anwendungs- und Planungshilfen* bereit.

Zur übersichtlichen Lesbarkeit und Anwendbarkeit untergliedert sich der Leitfaden in mehrere Teile, die in der folgenden Grafik dargestellt werden. Die einzelnen Teile stehen unter <https://www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan> zum Download zur Verfügung.

<b>Teil 1: Konzeption des RessourcenPlans</b>	<i>Definition RessourcenPlan Definition RessourcenPlan als Planungsinstrument inkl. Bewertungssystematik Herleitung RessourcenPlan als rechtliches Instrument Empfehlungen für Beteiligungsformate</i>	
<b>Teil 2: Elemente des RessourcenPlans</b>		
<b>2.1:</b> Ressourcenmanagement Niederschlagswasser	<i>Sektorale Betrachtungen zu (i) Werkzeugen des Ressourcenmanagements und (ii) Bewertung der Ressourceneffizienz  Aufstellung <b>sektoraler</b> RessourcenPläne</i>	<b>2.5:</b> Ressourcenmanagement Fläche <i>Integrierte, lokal-funktionale Betrachtungen zu (i) Werkzeugen des Ressourcenmanagements und (ii) Bewertung der Ressourceneffizienz  Aufstellung RessourcenPlan</i>
<b>2.2:</b> Ressourcenmanagement Schmutzwasser		
<b>2.3:</b> Ressourcenmanagement Baustoffe		
<b>2.4:</b> Ressourcenmanagement Energie		
<b>Teil 3: Anwendungs- und Planungshilfen</b>		
<b>3.1:</b> Kurzanleitung RessourcenPlan	<i>Schritt-für-Schritt-Anleitung; Kurzübersichten zu Treibern, Indikatoren, Instrumenten und Daten</i>	
<b>3.2:</b> Lernen von anderen – Booklet „Best-Practice“	<i>Best-Practice-Beispiele für Planungs- und Beteiligungsprozesse, Verwaltungsstrukturen und Quartiersgestaltung</i>	
<b>3.3:</b> Maßnahmensteckbriefe	<i>Maßnahmensteckbriefe für Maßnahmen des Quartiersmanagements für Wasser, Baustoffe und Energie</i>	
<b>3.4:</b> Stakeholder-Beratung blau-grüne Infrastrukturen	<i>Empfehlungen und Materialien für die Stakeholderberatung zum Thema blau-grüner Infrastrukturen</i>	
<b>3.5:</b> Baukonstruktionskatalog (Aufteilung in zwei Dokumente)	<i>Katalog zur Abschätzung von Materialmengen und -zusammensetzungen verschiedener Baukonstruktionen 3.5.1: Erläuterungen 3.5.2: Steckbriefkatalog</i>	

## Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i> .....	1
<b>I. WERKZEUGKASTEN</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Instrumente zur Kartierung anthropogener Materiallager</b> .....	<b>4</b>
1.1 Anthropogenes Materiallager .....	4
1.2 Methodische Ansätze zur Erhebung anthropogener Materiallager .....	6
1.3 Ausgangssituation bei der Kartierung anthropogener Materiallager und Stoffströme.....	7
1.4 Klassifizierung der Modelle.....	8
<b>2 Das anthropogene Materiallager in Herne</b> .....	<b>10</b>
2.1 Abbildung anthropogener Materiallager und Stoffströme in Herne .....	12
2.1.1 Hochbau – Gebäude.....	12
2.1.2 Tiefbau - Straßen und Wege .....	14
2.1.3 Tiefbau – Kanalisation .....	17
2.1.4 Ergebnisse der Hochrechnung .....	20
<b>3 Zusammenfassung</b> .....	<b>23</b>
<b>II. BEWERTUNG</b> .....	<b>25</b>
<b>4 Systemisch-sektorale Bewertung</b> .....	<b>26</b>
<b>5 Materiallager und Treibhausgasemissionen</b> .....	<b>28</b>
5.1 Grundlagen Gebäude .....	28
5.2 Grundlagen Straßen und Wege .....	29
5.3 Grundlagen Kanalisation .....	30
5.4 Berechnung der Treibhauspotenziale in den Quartieren in Herne.....	31
5.5 Plausibilitätsprüfung .....	32
<b>III. ANHANG</b> .....	<b>35</b>
<i>Literaturverzeichnis</i> .....	36

---

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>42</b>

# I. Werkzeugkasten

## 1 Instrumente zur Kartierung anthropogener Materiallager

Der Bausektor spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung ressourceneffizienter Quartiere. Allein in Deutschland werden jährlich ca. 585 Mio. Mg mineralische Naturstoffe wie Steine, Sand und Kies abgebaut und zur Herstellung von Baustoffen verwendet. Hinzu kommen rund 100 Mio. Mg mineralische Sekundärrohstoffe (Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2023, S. 11).

Da bereits seit Jahren der Zubau (Input) größer als der Rückbau (Output) bzw. das Abfallaufkommen (ca. 229 Mio. Mg Bau- und Abbruchabfälle im Jahr 2020 (Destatis, 2022)) ist, wurde in den vergangenen Jahren ein großes anthropogenes Materiallager aufgebaut, welches in den nächsten Jahren noch intensiver genutzt werden sollte. Um diese Mengen bei der Planung und dem Bau zukünftiger Bauwerke berücksichtigen zu können, sind Kenntnisse über das anthropogene Materiallager (in Quantität und Qualität) sowie die daraus zu erwartenden Stoffströme notwendig. Somit können natürliche Vorkommen entlastet sowie die Deponierung von verwertbaren Ressourcen verhindert werden.

Im Gegensatz zu anderen Bereichen (vgl. u. a. *„Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele“* (LARSIM-Entwicklergemeinschaft - Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU, 2021)) gibt es für Baustoffe bislang kein standardisiertes Vorgehen zur Modellierung des anthropogenen Materiallagers und der daraus resultierenden Stoffströme. Im Rahmen des Forschungsprojekts „RessourcenPlan im Quartier“ (R2Q) sowie in einer laufenden Promotion an der FH Münster mit dem Arbeitstitel *„Baustoffhaushaltsmodell zur Kartierung regionaler anthropogener Lager im Hoch- und Tiefbau“* wurde bzw. wird an einer Modellierungsgrundlage für die Erhebung von Baustoffen im Bestand gearbeitet. Dieses Instrument, das so genannte *„Baustoffhaushaltsmodell“* (BHM), wurde in seinem aktuellen Arbeitsstand für die Erhebung des anthropogenen Materiallagers in zwei ausgewählten Beispiel-Quartieren in Herne eingesetzt. Im Folgenden werden der Hintergrund, die Methode und der aktuelle Arbeitsstand des Baustoffhaushaltsmodells, zur Kartierung anthropogener Materiallager sowie die Ableitung von Stoffströmen vorgestellt.

### 1.1 Anthropogenes Materiallager

Die Anthroposphäre beschreibt den Teil der Biosphäre, der durch menschliche Aktivität geschaffen und bewirtschaftet wird. Sie wird auch als die „gebaute Umwelt“ bezeichnet und bildet den Lebensraum des Menschen. Die Anthroposphäre ist damit ein komplexes System aus Energie-, Material- und Informationsflüssen (Baccini & Bader, 1996, S. 5). Durch die Entnahme und Verarbeitung natürlicher Ressourcen in Konsumgütern kommt es zur Verlagerung der Rohstoffe in die Anthroposphäre. Während die Materialien in kurzlebigen Konsumgütern in der

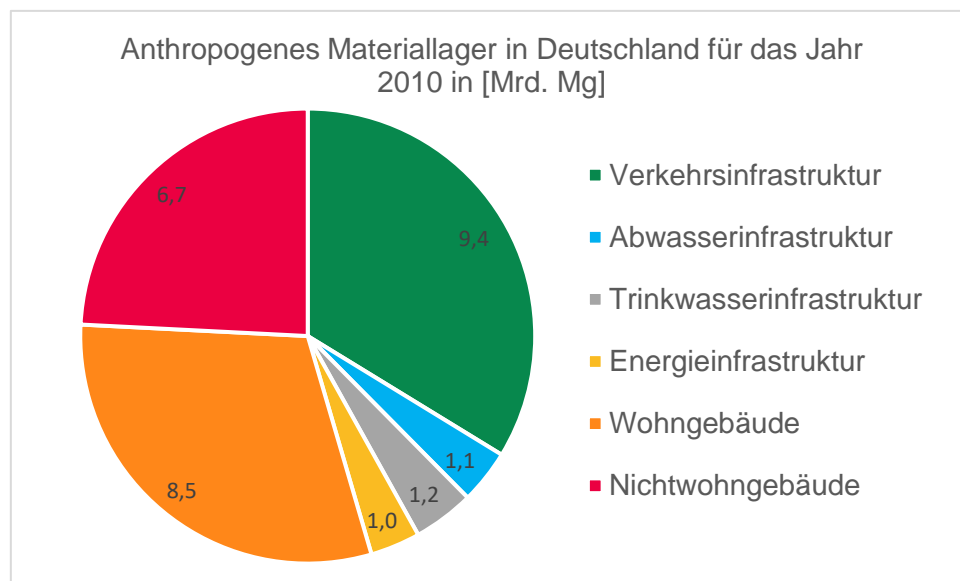


Anthroposphäre zirkulieren und der jährliche Input weitgehend auch dem jährlichen Output entspricht, werden durch langlebige Konsumgüter natürliche Ressourcen über längere Zeit gebunden. Es entsteht ein anthropogenes Rohstofflager.

Mittelfristig ist daher damit zu rechnen, dass die anthropogenen Materiallager eine unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten bedeutende Rohstoffquelle darstellen werden. Für eine systematische Bewirtschaftung dieser anthropogenen Rohstofflager sind Kenntnisse über die Materialien in Bezug auf Ort, Menge, Qualität und Freisetzung erforderlich.

Nach einer ersten Abschätzung im Auftrag des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2015 betrug das anthropogene Materiallager in Deutschland 1960 9,9 Mrd. Mg (Schiller et al., 2015, S. 279). Für das Jahr 2010 wurde mittels eines Bottom-Up-Ansatzes (siehe Kapitel 1.2), eine Materialmenge von rund 28 Mrd. Mg berechnet (Schiller et al., 2015, 80-86; 114-116).

Abbildung 1 zeigt eine Abschätzung des Materiallagers für die quantitativ relevantesten Bereiche. Dabei zeigt sich, dass die Verkehrsinfrastruktur und der Gebäudebestand mit Abstand den größten Anteil des anthropogenen Materiallagers darstellen, was auf den hohen mineralischen Anteil in Bauwerken und dessen hoher Dichte zurückzuführen ist.



**Abbildung 1.** Anthropogenes Materiallager in Deutschland für das Jahr 2010 in Mrd. Mg (eigene Darstellung nach Zahlen aus (Schiller et al., 2015, S. 80-86; S. 114-116))

Nach Abbildung 1 sind demnach mit ca. 15,2 Mrd. Mg rund 55 % des anthropogenen Materials in Wohn- und Nichtwohngebäuden zu finden. Die restlichen 45 % der Lagermengen verteilen sich auf die verschiedenen Bereiche des Tiefbaus, wobei die Verkehrsinfrastruktur hier den

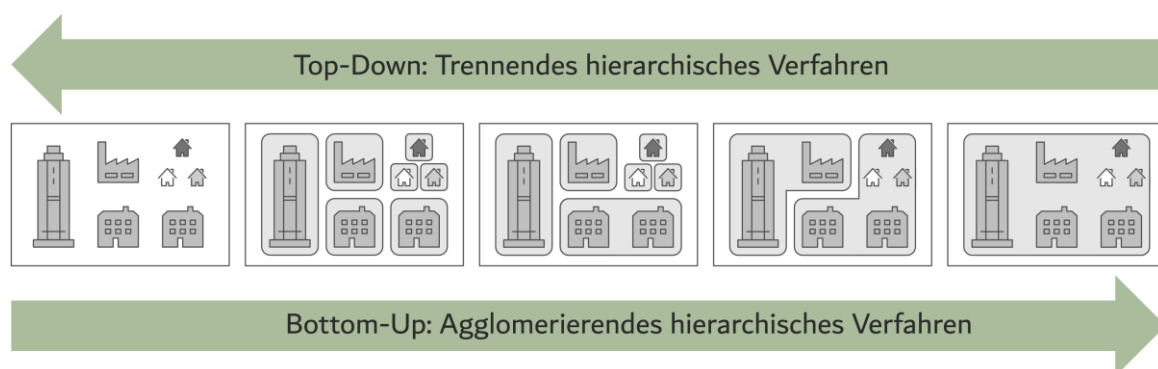
größten Anteil hat. Diese Zahlen lassen sich jedoch nicht auf einzelne Objekte herunterbrechen, zudem kommt es in der gleichen Studie mit einer anderen Methode zu größeren Abweichungen. Die Zahlen dienen daher eher der Orientierung.

## 1.2 Methodische Ansätze zur Erhebung anthropogener Materiallager

Unter der Prämisse, dass für eine zukünftige ressourceneffiziente Nutzung der Materialbestände (insbesondere auch auf regionaler Ebene) die vorliegenden Angaben über das Lager im Hoch- und Tiefbau nicht ausreichen, werden Methoden zur genaueren Bestimmung der Bestandsmassen benötigt. Im Wesentlichen existieren hierfür zwei grundlegende Methoden, die sich an der hierarchischen Clusteranalyse orientieren. Zum einen kann ein trennendes (Top-Down), zum anderen ein agglomerierendes (Bottom-Up) Vorgehen zur Annäherung und Abbildung des anthropogenen Materiallagers genutzt werden.

Für die Materialflussanalyse werden diese durch statische und dynamische Ansätze methodisch erweitert. Diese vier Ansätze (statischer und dynamischer Bottom-Up-Ansatz sowie statischer und dynamischer Top-Down-Ansatz) bilden die Basis für die Betrachtung von Beständen und Stoffströmen in unterschiedlichen Studien. Je nach Datengrundlage, Betrachtungsgebiet und weiteren Rahmenbedingungen kommt es in den einzelnen Studien im Detail zu einer sehr unterschiedlichen Herangehensweise (Augiseau & Barles, 2016, S. 158).

In Abbildung 2 ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei den beiden methodischen Ansätzen Top-Down und Bottom-Up skizziert.



**Abbildung 2.** Die methodischen Ansätze Top-Down und Bottom-Up zur Erhebung von Beständen (Eigene Abbildung, Erstveröffentlichung (Stretz, 2020))

Im **Top-Down-Ansatz** werden Zeitreihen von Nettozugängen zum Bestand, die aus relevanten Materialflüssen abgeleitet werden, berücksichtigt (Birat et al., 2014, S. 1496). Diese relevanten Materialflüsse können u. a. der umweltökonomischen Gesamtrechnung, den Daten der Produktionsstatistik und anderen Quellen entnommen werden. Die Daten sind überwiegend amtlich erhoben und zeichnen sich durch die damit verbundene relativ hohe Datengüte

sowie Verfügbarkeit aus. Zudem haben die Datensätze häufig eine hohe Akzeptanz und werden auch in anderen Bereichen für Analysen und Prognosen genutzt. Durch den Top-Down-Ansatz können eine schnelle Problemübersicht geschaffen, Systemzusammenhänge abgebildet (Kohler et al., 1999, S. 36) und für ein definiertes Gebiet (z. B. Deutschland) die entsprechenden Lagermengen abgeschätzt werden (siehe auch Kapitel 2.1 ab Seite 12). Sollen auf dieser Grundlage Materialzusammensetzungen für einen Teilabschnitt abgeleitet werden, z. B. für ein spezielles Objekt oder die Materialzusammensetzung einer Region (z. B. Bundesland oder Kommune), ist es erforderlich, Verteilungsschlüssel oder andere Hilfsgrößen anzuwenden.

Beim **Bottom-Up-Ansatz** wird die materielle Zusammensetzung der Objekte betrachtet, der Lagerbestand ergibt sich folglich aus der Summe der einzelnen Objekte. Für den Gebäudebestand ist somit z. B. die materielle Zusammensetzung für jedes Gebäude im Betrachtungsgebiet erforderlich. Ist die Anzahl der Objekte und/oder deren spezifische Materialzusammensetzung nicht bekannt, können für die Hochrechnung Siedlungstypen- und/oder Gebäudetypenvertreter herangezogen werden. Diese Annäherung erfolgt in der Regel über die Nutzungsart der Gebäude (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Bürogebäude etc.) bzw. den Siedlungstyp (wie freistehende Einzelgebäude, Reihenhäuser, etc.). Je nach Datenlage findet die Hochrechnung über synthetische Gebäude und Siedlungen oder eine Annäherung durch die reale Dimensionierung statt. Eine Möglichkeit bildet dabei die Hochrechnung anhand der DIN 277 Grundflächen und Rauminhalte (Deutsches Institut für Normung e. V., 2016) z. B. nach der Nutzfläche (Kohler et al., 1999, S. 19–20) oder dem Brutto-Rauminhalt (Görg, 1997). Für den Tiefbau werden analog je nach Betrachtungsgegenstand die einzelnen Objekte (z. B. bei Brücken) oder im Fall einer Netzstruktur (wie z. B. bei Verkehrsflächen oder Leitungsnetzen) einzelne Abschnitte über eine Bezugsgröße aufsummiert.

### 1.3 Ausgangssituation bei der Kartierung anthropogener Materiallager und Stoffströme

In den Abfallbilanzen des Statistischen Bundesamts ist die hohe Massenrelevanz von Bau- und Abbruchabfällen seit vielen Jahren quantitativ belegt. So betragen die Bau- und Abbruchabfälle über die letzten 24 Jahre nahezu konstant etwas mehr als 50 % des Gesamtabfallaufkommens in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2021, S. 33–34). Auf dieser Grundlage können zwar relativ spezifische Prognosen für die kommenden Jahre abgeleitet werden, allerdings bietet die Erhebungssystematik nur ein geringes, bis kein Potenzial zur Ableitung und Differenzierung spezifischer Stoffströme sowie der Abbildung des anthropogenen Materiallagers.

Für eine gezielte Bewirtschaftung der anthropogenen Materiallager und der Umsetzung von „Urban-Mining-Strategien“ sowie der Transformation in Richtung Zirkularität im Bauwesen ist die qualitative und quantitative Beschreibung der Lager erforderlich. Diese Voraussetzung ist in der Forschung bereits seit Jahrzehnten thematisiert. So wurde dieses Themenfeld unter anderem durch das Institut für angewandte Ökologie e. V. (kurz Öko-Institut) und das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung Dresden e. V. (kurz IÖR) bereits Ende der 1990er Jahre behandelt. Beide Institutionen wirken seit 2012 auch an den Studien im Rahmen der Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland mit.

Neben den hier namentlich genannten Studien gibt es noch einige weitere relevante Studien, die sich in ihrer Ausprägung und ihrem Schwerpunkt unterscheiden. Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass der Großteil der Forschungsaktivitäten zum anthropogenen Materiallager den Hochbau betrachtet. Für den Tiefbau liegen erheblich weniger Studien vor, eine kombinierte Betrachtung von Hoch- und Tiefbau ist nur vereinzelt zu finden. Weitere Defizite dieser Ansätze liegen in deren Übertragbarkeit, der Aktualität und/oder der Flexibilität sowie der einfachen Anwendbarkeit. Das bisherige Ziel der Studien lag in der Regel in der Abbildung der Materialien für ein Betrachtungsgebiet und nicht in der Übertragbarkeit.






#### 1.4 Klassifizierung der Modelle

Je nach Zielstellung der Erhebung des anthropogenen Materiallagers unterscheiden sich die Anforderungen an das Modell. So ist für erste strategische Entscheidungen eine Abschätzung ausreichend. Für ein gezieltes Stoffstrommanagement werden jedoch spezifische Informationen zur Menge, Qualität und Verfügbarkeit benötigt.

Um den Informationsgehalt von Modellen zu spezifizieren, wird häufig von einem Detaillierungsgrad, Fertigstellungsgrad, Reifegrad oder auch Informationsgrad gesprochen. So findet z. B. bei der digitalen Gebäudemodellierung (im Rahmen von Building Information Modeling (BIM)) häufig das Klassenmodell "Level Of Development" (LOD) Anwendung (American Institute of Architects; BIMForum, 2013). Dabei wird in der Regel zwischen Vorentwurfsmodell, Entwurfsmodell, Genehmigungsmodell, Modell zur Angebotskalkulation, Ausführungsmodell und dem digitalen Zwilling unterschieden, was durch das "Level Of Development" (LOD) in 100er-Schritten von 100 bis 500 abgebildet wird. Auch bei der virtuellen Darstellung von 3D-Stadtmodellen kommt eine Klassifizierung mit der Bezeichnung "Level of Detail" (LoD) zum Einsatz (Löwner & et al., 2012, S. 340).

Unter Berücksichtigung bestehender Studien sowie deren Anforderung bzw. Zielstellung wurden fünf Modelle zur Kartierung anthropogener Materiallager und deren spezifische Anwendungsfälle erarbeitet. Angelehnt an bestehende Systematiken wurde die Bezeichnung "Level of Specification", mit der Abkürzung "LoS", in 100er-Schritten von 100 bis 500 eingeführt.

Die Abbildung 3 zeigt eine Zusammenstellung der entwickelten Modellklassen, ihrer Teilbereiche und Anwendungsfälle.

Fiktives Modell	Exemplarisches Modell	Statistisches Modell	Bestands-Modell	Digitaler Bestand
				
LoS 100	LoS 200	LoS 300	LoS 400	LoS 500
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objekt:</b> nicht abgebildet</li> <li>• <b>Material:</b> Werkstoffgruppen (grob)</li> <li>• <b>Raumbezug:</b> Gebiet, Raster</li> </ul> → Hohe Unsicherheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objekt:</b> Raumebene</li> <li>• <b>Material:</b> Werkstoffgruppen</li> <li>• <b>Raumbezug:</b> Punkt-/Linienvektoren</li> </ul> → Unsicherheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objekt:</b> Objektebene</li> <li>• <b>Material:</b> Werkstoffhauptgruppen</li> <li>• <b>Raumbezug:</b> Polygonfläche</li> </ul> → Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objekt:</b> Konstruktionsebene</li> <li>• <b>Material:</b> Werkstoffsorten</li> <li>• <b>Raumbezug:</b> 3D-Modell</li> </ul> → Definierte Toleranzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objekt:</b> Bauteilebene</li> <li>• <b>Material:</b> Werkstoffarten</li> <li>• <b>Raumbezug:</b> 3D-Modell</li> </ul> → Geringe Toleranzen
Abschätzung der Materialbestände als Wissensgrundlage für die Ableitung weiterer Schritte	Abbildung und Visualisierung der abgeschätzten Materialbestände, sowie der Ableitung bzw. Identifizierung von Hotspots	Abbildung und Analyse des Materiallagers als Grundlage für Bilanzen, Vorhersagen und Simulationen	Grundlage für ein Stoffstrommanagement, Rückbau- und Verwertungsplanung, Kostenvorhersagen und die Entwicklung von Szenarien → <b>Materialpass</b>	Detaillierte Bauwerksdokumentation, nutzbar für Betrieb und Instandsetzung, Mängelmanagement, sowie Demontage und Rücknahme einzelner Komponenten → <b>BIM-Modell</b>

**Abbildung 3. Übersicht der Level of Specification (LoS) bei der Modellierung anthropogener Materiallager und Stoffströme, mit Teilbereichen sowie den jeweiligen Anwendungsfällen (Stretz, 2022)**

Das **LoS 100** ermöglicht die Abschätzung der Materialbestände für die Ableitung weiterer Maßnahmen und dient als strategisches Instrument. Mit dem **LoS 200** können die Materialbestände bereits für unterschiedliche Bereiche (wie Hochbau, Straßen und Wege, etc.) differenziert und räumlich visualisiert werden. Sie werden für die Kommunikation und das Aufzeigen von Hotspots angewendet. Das **LoS 300** schließt die Lücke zwischen den Modellen auf Basis theoretischer und realer Datensätzen bzw. Informationen (siehe weitere Ausführung in Kapitel 2.1). Mit dem **LoS 400** werden bereits Gebäudepässe vorausgesetzt und die Grundlage für ein Stoffstrommanagement, Kostenvorhersagen, Rückbau- und Verwertungsplanungen sowie die Entwicklung von Szenarien geschaffen. Das **LoS 500** bietet durch das detaillierte digitale Gebäudemodell u. a. die Möglichkeit des Mängelmanagements sowie der Demontage und den Rückbau einzelner Komponenten.

Zur Erfüllung der Anwendungsabsicht des jeweiligen Modells muss der Informationsgehalt der einzelnen Teilbereiche Objekt, Material und Raumbezug in ausreichender Tiefe beschrieben werden. Dabei ist das Material und der Raumbezug notwendig und hinreichend für die Abbil-

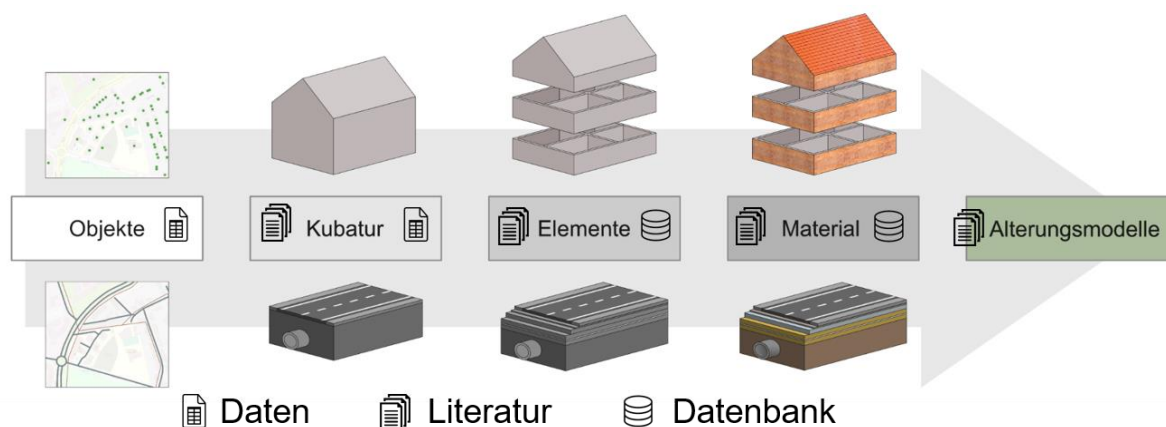
dung des Materiallagers. Durch die Beschreibung des Objekts werden jedoch wesentliche Attribute und Zusammenhänge für die Dynamik und Bewirtschaftung der anthropogenen Stoffströme gegeben.

## 2 Das anthropogene Materiallager in Herne

Da die Modelle mit dem LoS 100 und 200 bei der Anwendung und Verwertbarkeit schnell an Grenzen stoßen und die Datengrundlagen für LoS 400 bzw. LoS 500 nach aktueller Einschätzung kurz bis mittelfristig nicht zur Verfügung stehen werden, bieten Modelle mit dem LoS 300 ein großes Potenzial.

Mit Hilfe des sogenannten Baustoffhaushaltsmodells (kurz BHM) soll durch die Nutzung einheitlicher (und flächendeckend verfügbarer) Datensätze sowie einer detaillierten Beschreibung des Vorgehens die Ermittlung eines regionalen anthropogenen Materiallagers mit relativ geringem Aufwand und in kurzer Zeit durchgeführt werden können.

Die Abbildung 5 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte des Baustoffhaushaltsmodells.



**Abbildung 4. Schritte des Baustoffhaushaltsmodells (Eigene Darstellung nach (Stretz, 2020))**

Die Datengrundlagen für das Baustoffhaushaltsmodell im Hochbau liefern die Hausumringe (bebaute Fläche als Polygon, siehe Abbildung 6) des Betrachtungsgebiets, die im Katasteramt der Kommune vorliegen sollten. Damit stehen die Objekte quantitativ und räumlich mit weiteren Informationen, wie z. B. der Gebädefunktion, zur Verfügung. Über die mittlere Gebäudehöhe wird der Brutto-Rauminhalt (=Kubatur) für die einzelnen Gebäude ermittelt. Dieser bildet zusammen mit weiteren Attributen (z. B. Baujahr, Umfang und Gebädefunktion) und einer Datenbank mit Referenzgebäuden die Grundlage für die Elementierung in die unterschiedlichen Baukonstruktionen (=Elemente). Diesen werden anschließend Materialzusammensetzungen und Nutzungszeiten zugewiesen.



Im Tiefbau wird wie in Abbildung 4 dargestellt analog vorgegangen. Die Datengrundlage für die Kanalisation liefern die Aufzeichnungen der Haltungen und Schächte. Durch die spezifischen Attribute der Objekte wird eine Verknüpfung zu Regelquerschnitten abgeleitet und über den laufenden Meter hochgerechnet. Bei den Verkehrsflächen werden ebenfalls verfügbare Geodaten als Datengrundlage genutzt. Hierbei steht u. a. das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis DLM) zur Verfügung. Die Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt der enthaltenen Informationen, wobei für die Betrachtung der anthropogenen Materiallager der Datensatz auf die Straßen reduziert wird (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Beschreibung der topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat auf der Grundlage der Festlegungen des ATKIS®-Objektartenkatalogs (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2021)

Auf dieser Grundlage können regionale anthropogene Materiallager sowie Stoffströme abgeschätzt werden und stehen für Bilanzen, Prognosen und Simulationen zur Ableitung und Realisierung von Nutzungsstrategien der regionalen Sekundärrohstoffe zu Verfügung. Diese Systematik ermöglicht ebenfalls die Berücksichtigung, Verwaltung und Dokumentation von anderen LoS-Modellen (siehe Abbildung 3).

Bei der Verarbeitung und Dokumentation wird auf Standardformate und -software sowie Open Source zurückgegriffen, um die Anwendung unabhängig von kostenpflichtigen Programmen umsetzen zu können.

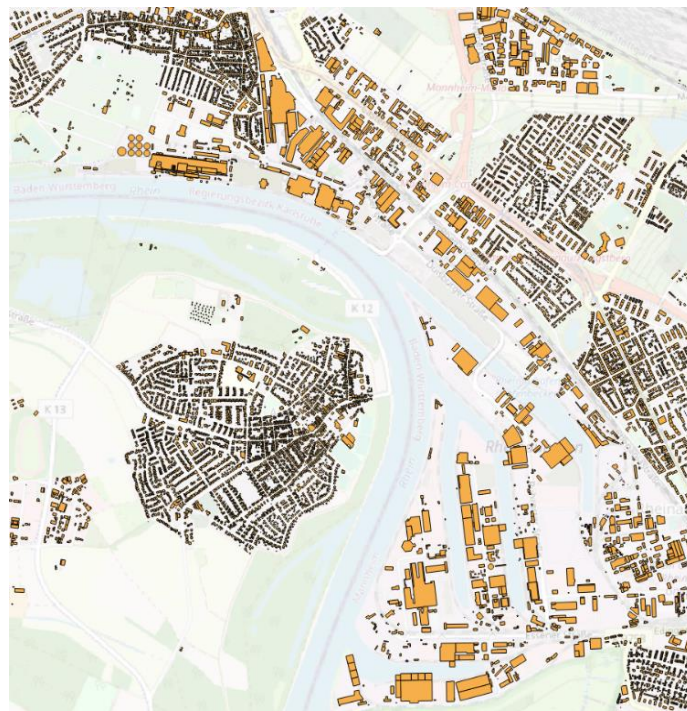
Dieses Konzept wurde im Verlauf des Forschungsvorhabens „RessourcenPlan im Quartier“ weiterentwickelt und in seinem aktuellen Arbeitsstand für die Berechnung der anthropogenen Materiallager in den zwei Untersuchungsquartieren in Herne angewendet.

## 2.1 Abbildung anthropogener Materiallager und Stoffströme in Herne

Im Folgenden wird das Vorgehen und die Berechnung der anthropogenen Materiallager in den Beispielquartieren in der Stadt Herne (siehe Leitfaden RessourcenPlan, Teil 1) für die Bereiche Gebäude, Straßen und Wege sowie der Kanalisation dargestellt.

### 2.1.1 Hochbau – Gebäude

Durch die Zusammenarbeit mit der Kommunalverwaltung in Herne konnten für die Hochrechnung aktuelle Informationen aus dem Katasteramt herangezogen werden. Im Zusammenhang mit der Kartierung anthropogener Lager im Hochbau stehen aber u. a. auch die Hauskoordinaten, die Hausumringe (siehe Abbildung 6) und 3D-Gebäudemodelle öffentlich zur Verfügung. Bei den Daten handelt es sich um georeferenzierte Datensätze für Gebäude in Deutschland, welche in der Regel aus dem amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (kurz: ALKIS) entnommen werden können. Diese Datensätze unterscheiden sich im Wesentlichen lediglich durch die Aktualität sowie den Umfang der Objektbeschreibung und stehen auf der Homepage der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung.



**Abbildung 6. Testdatensatz einiger Hausumringe der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map) (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2022)**



In Abbildung 7 sind die Datensätze aus dem Katasteramt über den aktuellen Gebäudebestand in Form der Gebäudegrundrisse (blaue Polygone) für einen Teilbereich des betrachteten Quartiers zu sehen. Darüber wurden die Informationen aus den LoD-Modellen gelegt. Durch eine räumliche Verschneidung der Informationen konnte so den Gebäudegrundrissen eine Gebäudehöhe zugerechnet und daraus ein vereinfachter Brutto-Rauminhalt ermittelt werden.

$$BRI_{\text{Gebäude}} = \text{Gebäudegrundriss}_{\text{ALKIS}} * \text{Gebäudehöhe}_{\text{LoD-Gebäudemodell}}$$



**Abbildung 7. Verschneidung der Grundrisse mit der Gebäudehöhe aus den LoD-Modellen (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map)**

Fehlende Informationen zur mittleren Gebäudehöhe wurden mit der durchschnittlichen Gebäudehöhe in dem Betrachtungsgebiet ergänzt. Informationen über eine mittlere Gebäudehöhe ohne passenden Gebäudegrundriss aus den Daten des Katasteramts wurden verworfen. Danach ergibt sich für die beiden Quartiere folgender Bestand (siehe Tabelle 1), wobei deutlich wird, dass sich im Quartier Strünkede die deutlich größeren Gebäude befinden:

**Tabelle 1. Übersicht der Gebäudeanzahl in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnungen)<sup>1</sup>**

Betrachtungsgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Objekte [Stk.]	∑ Brutto-Rauminhalt [m <sup>3</sup> ]
Herne-Strünkede	1,5	487	1.093.293
Herne-Pantringshof	0,9	537	513.181

Für das Baustoffhaushaltsmodell (BHM) sind als nächste Schritte die Ableitung einzelner Bauelemente wie Außenwände, Innenwände und Dachfläche auf Grundlage weiterer Informationen erforderlich. Da die Datengrundlage für dieses Vorgehen zum Zeitpunkt der Hochrechnung noch nicht abschließend zur Verfügung stand, wurde die Hochrechnung der Materialien auf Grundlage verfügbarer Daten aus der Literatur abgeleitet und pro m<sup>3</sup>-Brutto-Rauminhalt errechnet.

Zur Hochrechnung wurden die Gebäudetypenvertreter der Bauwerksdatenbank (siehe (Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR))) herangezogen und für Wohn- und Nichtwohngebäude ein Materialkennwert pro m<sup>3</sup>-Brutto-Rauminhalt abgeleitet.

Zudem wurde im Rahmen des Projekts ein Baukonstruktionskatalog (BKK) erstellt, welcher umfangreiche Informationen über typische Gebäudekonstruktionen wie Außenwände, Innenwände, Decken etc. bereithält und als Orientierungshilfe bei der Zuordnung von Materialmassen im Gebäudebestand helfen kann. In rund 80 Steckbriefen werden die einzelnen Konstruktionen für die verschiedenen Kostengruppen nach DIN 276 Kosten im Bauwesen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018) u. a. mit ihrer Verbreitung und den jeweiligen Bauepochen beschrieben sowie eine Bewertung zur Rückbaufähigkeit, Wiederverwendung und Recyclingfähigkeit gegeben. Die Ausführung ist im Leitfaden RessourcenPlan, Teil 3.5.1 und 3.5.2 zu finden.

### 2.1.2 Tiefbau - Straßen und Wege

Bei der Berechnung des anthropogenen Lagers der Straßen und Wege konnte ebenfalls auf Daten der Stadt Herne zurückgegriffen werden. Diese Daten stammen aus einer Kamerabefahrung zur Erfassung des Straßenzustands und beinhalten Angaben zu Flächen sowie zum

---

<sup>1</sup> Es handelt sich dabei um jeweils größere Teilflächen der beiden Stadtteile; Der gesamte Stadtteil Strünkede weist offiziell eine Fläche von 2,2 km<sup>2</sup> und der gesamte Stadtteil Pantringshof eine Ausdehnung von 1,2 km<sup>2</sup> auf.

Obermaterial. Die linke Seite in Abbildung 8 zeigt einen Auszug des entsprechenden Datensatzes in dem freien Geoinformationssystem QGIS. Auf der rechten Seite befindet sich der Datensatzauszug aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell vom Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS), in dem die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat beschrieben werden. Der ATKIS-Datensatz wurde für diesen Anwendungsfall auf den Bereich der Straßen und Wege reduziert.



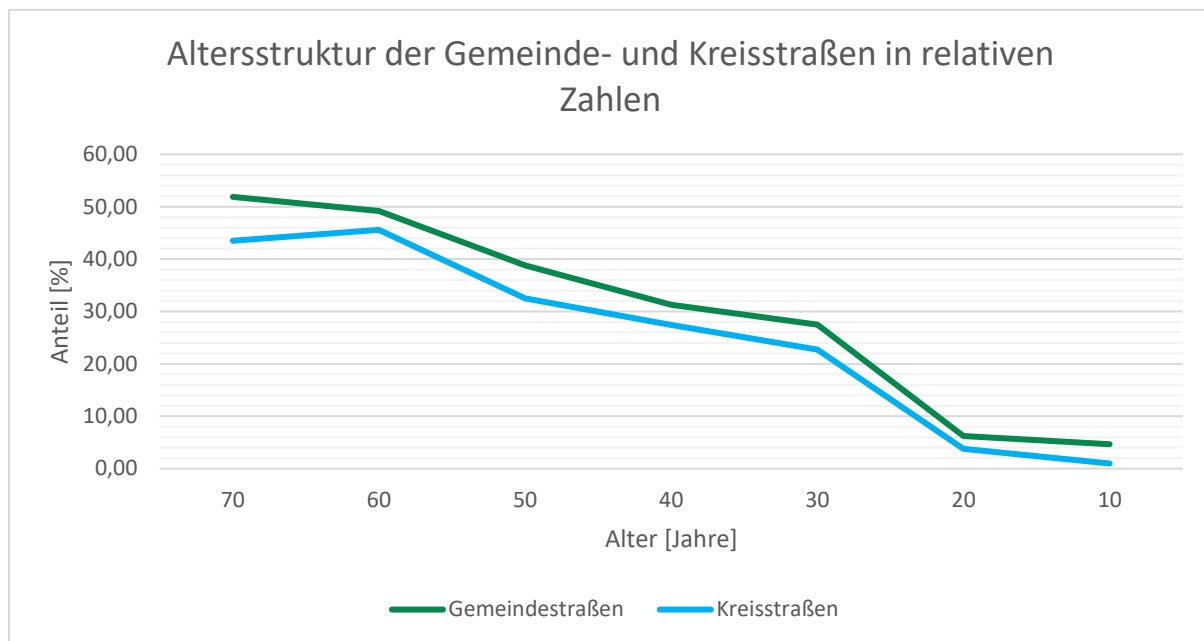
**Abbildung 8. Links: Straßenflächen auf Basis interner Daten der Stadt Herne  
Rechts: Straßenlinien aus dem ATKIS Basis DLM (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map)**

Ein wesentlicher Unterschied bei den Datensätzen besteht darin, dass der Datensatz der Stadt Herne bereits durch Polygone die Flächenverhältnisse des Straßenkörpers abbildet, während beim ATKIS-Basis-DLM lediglich Linienvektoren zur Verfügung stehen. Die entsprechende Information der Straßenbreite wird bei den ATKIS-Daten in der Attributtabelle als Durchschnittswert eines längeren Streckenabschnitts abgebildet (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2018, S. 240).

Vergleicht man die linke und rechte Abbildung innerhalb des Betrachtungsbereichs (linke Seite bis zur roten Markierung), ist zu erkennen, dass der ATKIS-Basis-DLM-Datensatz (rechts) einige Straßen beinhaltet, welche im Datensatz von Herne bisher nicht enthalten sind, was tendenziell zu einer Unterschätzung in der Hochrechnung (siehe Kapitel 2.1.4) führt, wenn man den Datensatz von Herne anwendet.

Für das übergeordnete Straßennetz (Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen) liegt über die Straßeninformationsbank (sib) der Länder eine zentrale Informationsquelle vor. Dabei nehmen die verfügbaren Informationen von Bauwerken des Bundes hin zur Baulast der Kreise erheblich ab und sind für Kreis- und Gemeindestraßen nicht verwertbar (Knappe & Reinhardt, 2015, S. 26).

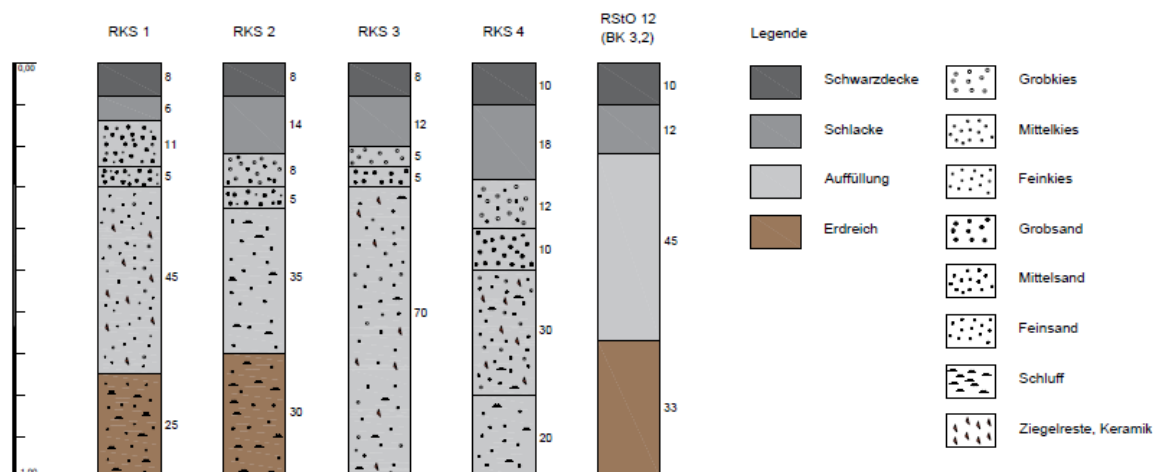
Eine weitere Herausforderung sind der hohe Anteil älterer Gemeinde- und Kreisstraßen (siehe Abbildung 9) sowie regionale Unterschiede bei der Bauausführung, für die keine typischen Aufbauten zur Verfügung stehen, siehe Ausführung unten.



**Abbildung 9. Relative Zahlen der Altersstruktur in Deutschland für die Gemeinde- und Kreisstraßen (Eigene Darstellung basierend auf (Bundesminister für Verkehr, 1991; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2014))**

Wie in Abbildung 9 zu sehen, ist der Großteil des kommunalen Straßennetzes in Deutschland mindestens 50 Jahre alt. In den letzten 25 Jahren wurden lediglich rund 10 % der Kreis- und Gemeindestraßen errichtet. Das heißt zum einen, dass in den nächsten Jahren mit einem erhöhten Anteil an Erneuerungsmaßnahmen gerechnet werden muss. Zum anderen, dass ein Großteil der kommunalen Straßen noch vor bzw. in den Anfängen der Einführung aktuell geltender Regelungen zum Straßenbau, wie die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012), entstanden sind.

Der Versuch, Straßentypenvertreter zu bilden auf Grundlage derer eine Hochrechnung der Materialmassen vorgenommen werden kann, hat sich als sehr aufwendig herausgestellt und konnte im Rahmen des Projekts nicht abschließend betrachtet werden. Die Abbildung 10 zeigt die Gegenüberstellung verschiedener Kernlochbohrungen eines Straßenabschnitts in Herne mit dem Regelaufbau aus der RStO 12. Die unterschiedlichen Bohrungen wurden in einem Abstand von 50 bis 100 m und mit einer Tiefe von einem Meter vorgenommen. Die farbliche Darstellung bezieht sich auf die Funktion der Materialien und Schicht (daher: dunkelgrau entspricht der Deckschicht, grau entspricht der Tragschicht und hellgrau der Frostschutzschicht).



**Abbildung 10. Gegenüberstellung verschiedener Proben eines Straßenabschnitts (aus Kernlochbohrungen) in Herne mit einem Regelquerschnitt nach RStO 12 (angegebenes Material ist in RStO nicht aufgelistet, Abbildung bezieht sich nur auf die Schichtdicken von Deck-, Binder-, Trag- und Frostschutzschicht) (Eigene Darstellung)**

Es ist eine deutliche Schwankungsbreite im Straßenaufbau bei den unterschiedlichen Proben hinsichtlich Dimensionierung und Materialzusammensetzung zu erkennen. So kann bei den Proben RKS 3 und RKS 4 keine Aussage über die Gesamtdimensionierung getroffen werden, da der gewachsene Boden bei einer Bohrtiefe von einem Meter nicht erreicht wurde.

Die Hochrechnung wurde daher auf Grundlage der spezifischen Fläche (siehe Tabelle 2) sowie Materialkennwerten aus der Literatur pro Quadratmeter Verkehrsfläche vorgenommen (Schiller et al. 2015).

**Tabelle 2. Übersicht über die Verkehrsflächen in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnungen)**

Betrachtungsgebiet	Fläche Quartier [km <sup>2</sup> ]	Polygone [Stk.]	$\Sigma$ Verkehrsfläche [m <sup>2</sup> ]
Herne-Strünkede	1,5	595	137.925
Herne-Pantringshof	0,9	356	71.345

Grundsätzlich ist festzustellen, dass für die Berechnung spezifischer regionaler anthropogener Materiallager in den Verkehrsflächen, weiterer Forschungsbedarf besteht.

### 2.1.3 Tiefbau – Kanalisation

Durch die gültigen gesetzlichen Regelungen auf National- und Landesebene ist die Datenverfügbarkeit für die Abwasserinfrastruktur sehr gut, zudem werden Geoinformationssysteme in

diesem Bereich bereits seit Jahrzehnten eingesetzt und sind fester Bestandteil der Datenverarbeitung (vergl. u. a. „Baufachliche Richtlinien Abwasser“ A-10.1 Fristen für Instandhaltungsarbeiten an abwassertechnischen Anlagen (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019)). Diese Daten sind im Gegensatz zu denen des Hoch-, Straßen-, und Wegebbaus nach aktuellem Kenntnisstand nicht öffentlich zugänglich, obwohl u. a. die Angaben zu den Versorgungseinrichtungen der Abwasserentsorgung durch das Geodatenzugangsgesetz (GeoZG) Abs. 2 § 4 und Abs. 3 § 6 über elektronische Netzwerke öffentlich verfügbar sein sollen.

Somit ist bei der Betrachtung regionaler anthropogener Materiallager im Bereich der Kanalisation aktuell immer eine Zusammenarbeit mit der Kommune bzw. mit dem netzwerkbetreibenden Unternehmen notwendig.

Über einheitliche Codier-Systeme zur Zustandsbewertung der Kanalisation besteht auch eine definierte Beschreibung der vorhandenen Datensätze. Nach einer bundesweiten Erhebung kommt für die Bewertung bzw. Dokumentation überwiegend (rund 57 %) die europäische Norm DIN EN 13508-2 „Zustandserfassung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ zum Einsatz. Bei rd. 18 % der Bewertungen wird die ISY-BAU genutzt, die restlichen 25 % verteilen sich auf mehrere andere Systeme (Berger & et al., S. 6).

In Abbildung 11 ist ein Teilausschnitt eines Quartiers in Herne mit dem Verlauf der Haltungen (Linien) und Schächte (Punkte) zu sehen. Die einzelnen Objekte bzw. Abschnitte sind im ISY-BAU Format angelegt und werden durch weitere Attribute beschrieben. Eine Materialmasse ist in dem Datensatz zwar nicht vorgesehen, allerdings sind unabhängig von der Masse ein Großteil der erforderlichen Informationen für die Hochrechnung in den Attributen zu finden: Für die Haltung sind u. a. die Länge, die Profilhöhe und Profilbreite sowie die Materialart der Rohrleitung dokumentiert.

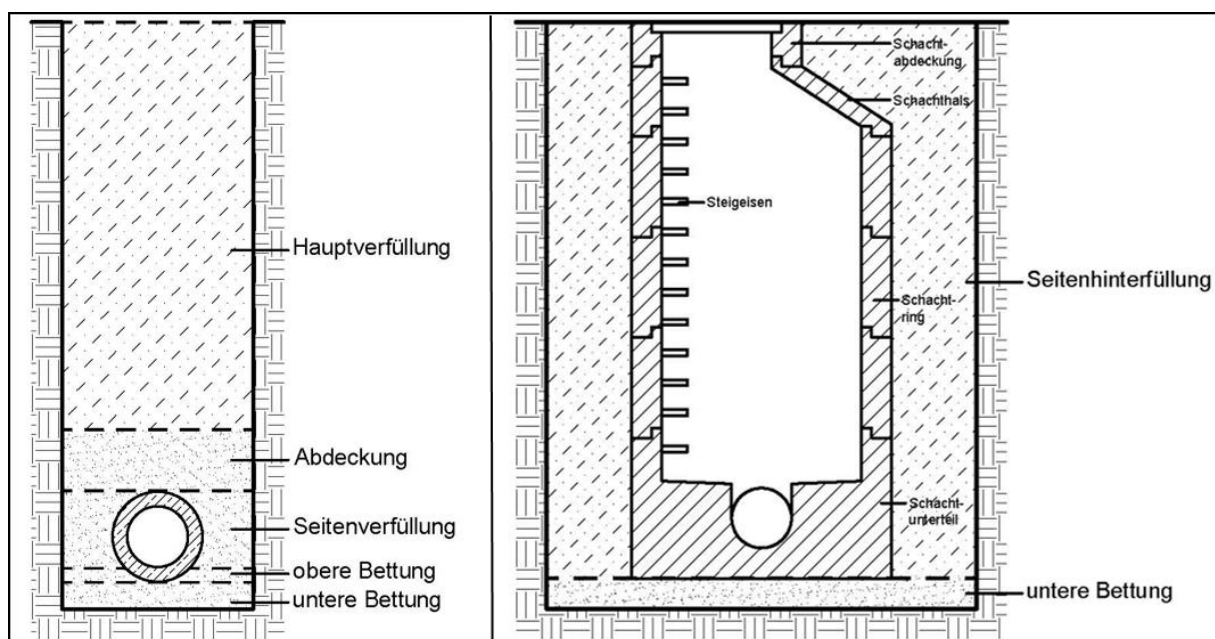




**Abbildung 11. Haltungen und Schächte für einen Quartiersausschnitt in Herne (eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map)**

Um das Kanalnetz mit Materialdaten verknüpfen zu können, wurde auf Grundlage der Schächte und Haltungen in Herne eine Konstruktionsdatenbank erarbeitet. In der Summe umfasst die Datenbank 97 Objekte (68 Haltungsarten/-typen und 29 Schachtarten/-typen).

Abbildung 12 zeigt die einzelnen Funktionseinheiten der Objekte, die in die Materialhochrechnung eingehen. Bei der vorliegenden Massenberechnung wurde auch die Baugrube mit ihrer Verfüllung und Bettung berücksichtigt.



**Abbildung 12. Aufbau eines Kanalschachts (links) und einer Haltung (rechts) mit den einzelnen Funktionseinheiten (eigene Darstellung)**

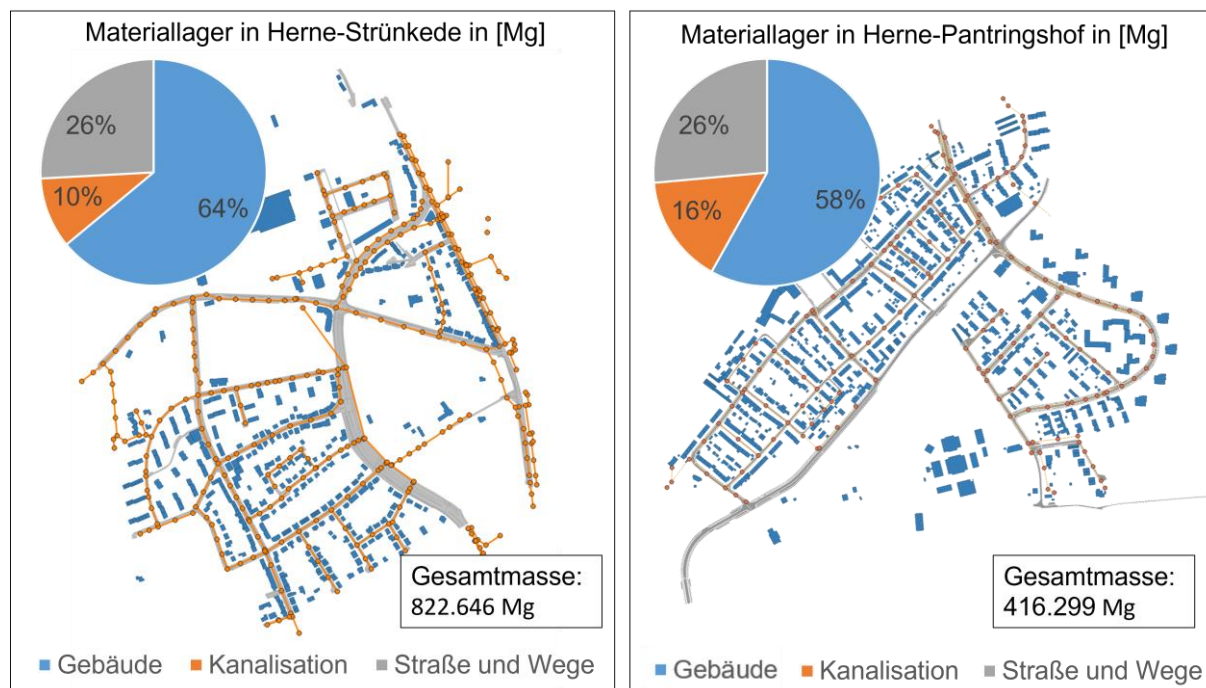
Tabelle 3 zeigt eine Auflistung für die beiden Quartiere mit der jeweiligen Fläche und den darin enthaltenen Schächten sowie den Haltungslängen.

**Tabelle 3. Übersicht der Schächte und Haltungslängen in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnung)**

	Fläche Quartier [km <sup>2</sup> ]	Schächte [Stk.]	Haltungslänge [m]
Herne-Strünkede	1,5	335	12.255
Herne-Pantringshof	0,9	184	7.408

### 2.1.4 Ergebnisse der Hochrechnung

Die Abbildung 13 zeigt die Gegenüberstellung des anthropogenen Materiallagers in den beiden untersuchten Quartieren Herne-Strünkede und Herne-Pantringshof. Für Strünkede wurde ein Materiallager von 822.646 Mg und für Pantringshof eines von 416.299 Mg ermittelt.



**Abbildung 13. Gegenüberstellung der Materiallager in Herne-Strünkede für den Hoch- und Tiefbau (Eigene Darstellung)**

Der Gebäudebestand hat den größten Anteil am Materiallager, wobei dieser Anteil in Strünkede mit 64 % geringfügig höher ist als in Pantringshof mit 58 %. Diese Unterschiede sind auf die Quartiersstruktur zurückzuführen. Während in Herne-Strünkede überwiegend Mehrfamilienhäuser (MFH) vorzufinden sind, wird Herne-Pantringshof in großen Teilen durch Einfamilienhäuser (EFH) geprägt. In beiden Quartieren beträgt der Anteil der Straßen und Wege je 26 % der Gesamtmasse. Die Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Massenverteilung auf die unterschiedlichen Betrachtungsfelder sowie deren Relationen in Bezug unterschiedlicher Parameter.



**Tabelle 4. Übersicht der Massenverteilung und Massenrelationen für die Betrachtungsfelder in den beiden Quartieren (Eigene Berechnungen)**

	Herne-Strünkede	Herne-Pantringshof
<b>Quartier</b>		
Materiallager [Mg]	822.646	416.299
Fläche [km <sup>2</sup> ]	1,5	0,9
<b>Gebäude</b>		
Materiallager Gebäude [Mg]	526.493	241.453
Quartiermassendichte Gebäude [kg/m <sup>2</sup> ]	351	268
Gebäude [Stk.]	487	537
Ø-Masse pro Gebäude [Mg/Stk.]	1.081	450
<b>Verkehrsflächen</b>		
Materiallager Verkehrsfläche [Mg]	213888,0	108237,7
Verkehrsfläche [m <sup>2</sup> ]	137.925	71.345
Quartiermassendichte Verkehrsfläche [kg/m <sup>2</sup> ]	143	120
<b>Kanalisation</b>		
Materiallager Kanalisation [Mg]	82.265	66.608
Haltungslänge [m]	12.255	7.408
Schächte [Stk.]	335	184
Quartiermassendichte Kanalisation [kg/m <sup>2</sup> ]	55	74

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, hat Herne-Strünkede eine wesentlich höhere Quartiersmassendichte in den Bereichen Gebäude und Verkehrsfläche. Pro Quadratmeter sind in Strünkede 351 kg in Gebäuden und 143 kg in Verkehrsflächen verbaut. In Pantringshof liegt der Wert bei den Gebäuden bei 268 kg/m<sup>2</sup> und bei der Verkehrsfläche bei 120 kg/m<sup>2</sup>. Besonders auffällig ist die Ø-Masse pro Gebäude, hier ist der Wert in Strünkede mehr als doppelt so hoch wie in Pantringshof

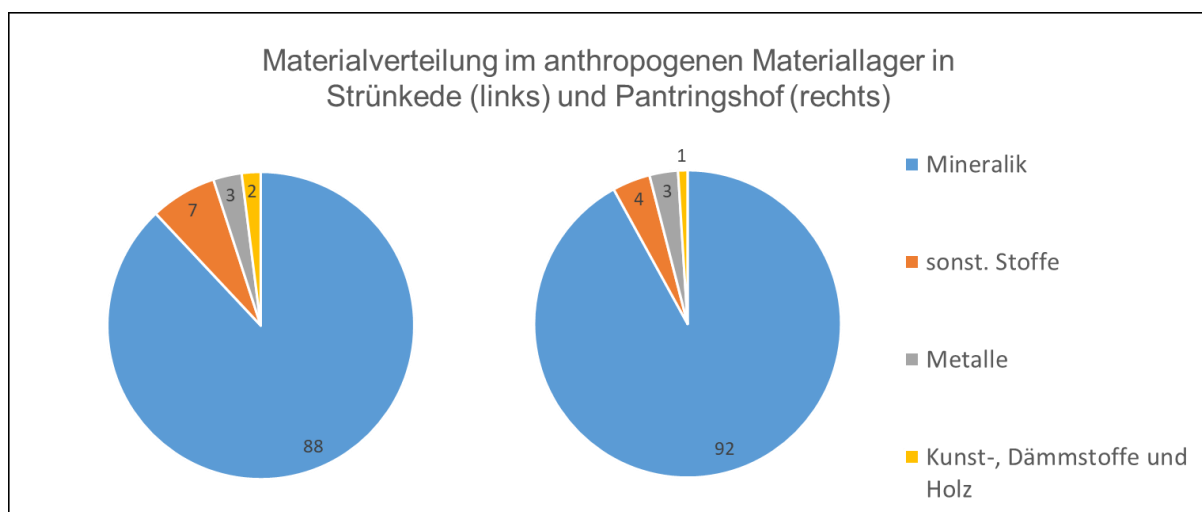
**Abbildung 14. Übersicht über die Materialverteilung im anthropogenen Materiallager in den beiden Quartieren in Herne. (Eigene Darstellung)**

Abbildung 14 zeigt die Verteilung der Materialien, in Strünkede besteht die Zusammensetzung aus 88 % Mineralik (ohne Metalle), 7 % sonstige Stoffe und 3 % Metalle. Die restlichen 2 % verteilen sich auf Kunststoffe, Dämmstoffe und Holz. Pantringshof hat eine ähnliche Verteilung, hier besteht das Lager aus 92 % Mineralik (ohne Metalle), 4 % sonstige Stoffe und 3 % Metalle. Die restlichen 1 % verteilen sich auf die Fraktionen Kunststoffe, Dämmstoffe und Holz.

In Tabelle 4 sind für eine erste Einordnung die Ergebnisse der Massenberechnung beider Quartiere pro Einwohner\*in abgebildet und den Ergebnissen aus der Studie Kartierung anthropogenes Lager in Deutschland (KartAL I) gegenübergestellt (Schiller et al., 2015).

Hierfür wurden die Angaben zur Bevölkerung der offiziellen Bekanntmachung der Stadt Herne zu den Stadtteilprofilen entnommen und über die Bevölkerungsdichte auf die betrachteten Quartiere angepasst. Demnach hat der betrachtete Bereich in Strünkede 5.527 Einwohner\*innen (Stadt Herne - Fachbereich Vermessung und Kataster, 2020, S. 32) und der Bereich in Pantringshof 1.892 Einwohner\*innen (Stadt Herne - Fachbereich Vermessung und Kataster, 2020, S. 50). Für die Berechnung der personenbezogenen Mengen aus den Ergebnissen von Schiller et al 2015 wurden 81,752 Mio Einwohner\*innen in Deutschland für das Jahr 2010 angesetzt (Statista Research Department, 2022).

**Tabelle 5. Gegenüberstellung der Massenberechnung im Hoch- und Tiefbau in Megagramm pro Einwohner\*in in den Quartieren und Vergleich mit den Ergebnissen aus der Studie KartAL I. (Eigene Berechnung mit Zahlen aus (Schiller et al., 2015; Stadt Herne - Fachbereich Vermessung und Kataster, 2020; Statista Research Department, 2022))**

	Herne-Strünkede [Mg/E]	Herne-Pantringshof [Mg/E]	KartAL I [Mg/E]
<b>Gebäude</b>	95,3	127,6	185,8
<b>Kanalisation</b>	14,9	35,2	13,1
<b>Straßen und Wege</b>	38,7	57,2	115,0
<b>Trinkwasserinfrastruktur</b>	-	-	14,8
<b>Energieinfrastruktur</b>	-	-	12,1
<b>Summe</b>	148,8	220,0	340,8

Die Studie KartAL I weist mit Ausnahme bei den Straßen und Wegen immer deutlich höhere einwohnerspezifische Werte auf. Ein Grund hierfür könnte sein, dass in dieser Studie auch Objekte des Hoch- und Tiefbaus berücksichtigt wurden, die außerhalb von bewohnten Gebieten liegen. Für einen detaillierten Vergleich und Diskussion der Gegenüberstellung wäre eine ausführliche Analyse u. a. auch der Betrachtungsgrenzen erforderlich.

Weiter ist zu erkennen, dass das Quartier Strünkede, auf Grund der oben genannten Quartiersstruktur mit überwiegender MFH-Bebauung, eine deutlich höhere Verdichtung aufweist

und somit einen um rund 32 % niedrigeren einwohnerspezifischen Materialbestand aufweist, als das Quartier Pantringshof.

### 3 Zusammenfassung

Die Rohstoffinanspruchnahme durch die Menschheit steigt seit Jahren kontinuierlich an. Mittelfristig ist daher damit zu rechnen, dass die anthropogenen Materiallager, welche durch langlebige Konsumgüter und Bauwerke gebildet werden, eine unter ökologischen und ökonomischen Aspekten bedeutende Rohstoffquelle darstellen werden.

Während für Primärrohstoffgruppen u. a. Datensätze für die Abbaustellen, Lagerstättenpotenzialräume und das Lagerstättenpotenzial existieren, fehlt diese Grundlage für Sekundärrohstoffe. Hinzu kommt die Herausforderung, dass natürliche Lagerstätten oftmals eine hohe Konzentration einzelner Rohstoffe aufweisen, während das anthropogene Materiallager durch eine große Anzahl unterschiedlicher natürlicher Ressourcen auf engstem Raum charakterisiert ist. Gemeinden und Kommunen sind in der Regel nicht in der Lage, Aussagen über den Materialbestand zu treffen, was die Grundlage für ein effektives Stoffstrommanagement von Sekundärrohstoffen wäre.

Um das anthropogene Materiallager zur Schließung regionaler Stoffströme im Bausektor optimal nutzen zu können, bedarf es spezifischer objektbezogener Informationen. Diese Informationen umfassen die Beschreibung:

- der Objekte
- der Materialien sowie
- des Raumbezugs.

Eine bundesweit übertragbare Erhebungsmethode zur Abbildung regionaler anthropogener Materiallager im Hoch- und Tiefbau ist zurzeit in der Entwicklung. Dieses sogenannte Baustoffhaushaltsmodell wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „RessourcenPlan im Quartier“ auf zwei Quartiere in Herne angewendet und erweitert.

Mit Hilfe regionalspezifischer Daten und den erarbeiteten Datenbanken konnte das anthropogene Materiallager abgeschätzt werden. Durch weitere Ergänzungen zu regionalen Besonderheiten kann die Aussagekraft der Hochrechnung verbessert werden. Besonders bei den Straßen und Wegen besteht ein Verbesserungspotenzial bei der Hochrechnung. Die Auswertung von Probenahmen in diesem Bereich haben gezeigt, dass der reale Aufbau stark von dem der aktuell geltenden Regelwerke abweicht, da die kommunalen Straßen und Wege überwiegend deutlich vor Inkrafttreten dieser Regelwerke gebaut wurden.

Der entwickelte Ansatz ist durch die Verwendung bundesweit einheitlicher (und flächendeckend verfügbarer) Daten übertragbar und liefert mit vergleichsweise geringem Aufwand die Ermittlung regionaler anthropogener Materiallager in Quartieren.

Auf dieser Grundlage können Maßnahmen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz im Bereich der Baustoffe abgeleitet und simuliert werden. Eine Auswahl verschiedener Ansätze ist im Maßnahmenkatalog abgebildet (Leitfaden RessourcenPlan, Teil 3.3). Einer der größten Faktoren ist die einwohnerspezifische Rohstoffinanspruchnahme. Dementsprechend hat in der Regel eine hohe Verdichtung einen positiven Einfluss auf die Ressourceneffizienz, wobei hierbei die Herausforderung in der attraktiven Gestaltung des Quartiers mit hoher Lebensqualität liegt.

## II. Bewertung

### 4 Systemisch-sektorale Bewertung

Für die Herstellung von Baustoffen werden jährlich ca. 585 Mio. Mg mineralische Naturstoffe verarbeitet (Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., 2023, S. 11). Dies entspricht einem Landverbrauch von etwa 14 Mio. m<sup>2</sup> pro Jahr. Bei der Verarbeitung dieser Mengen und dem damit verbundenen Transport entstehen 18 % der in Deutschland anfallenden NOx-Emissionen sowie 37 % der SO<sub>2</sub> – und CO<sub>2</sub>-Emissionen (Link, 2013).

Trotz dieser großen Materialmassenströme und den damit verbundenen Umwelteinwirkungen liegt der aktuelle Fokus bei der Bewertung der Ressourceneffizienz im Gebäudebereich nahezu ausschließlich auf der Nutzungsphase. Wird jedoch davon ausgegangen, dass neue Gebäude künftig im Nullenergiestandard oder sogar im Plusenergiestandard errichtet werden, können allein durch die Baukonstruktion bis zu 60 % des Energieaufwands im gesamten Lebenszyklus verursacht werden (Mahler et al., 2019, S. 25). Auch im Tiefbau werden bisher keine integralen Lebenszyklusbetrachtungen bei der Planung und Bewirtschaftung der Bauwerke berücksichtigt.

Grundlage für die Bewertung der Ressourceneffizienz von Baustoffen, Identifizierung von Ressourcenschutzpotenzialen sowie der Ableitung geeigneter Maßnahmen für ein ressourceneffizientes Quartier bildet der Materialbestand im Hoch- und Tiefbau (Ist-Stand).

Die Abbildung 15 zeigt die Einordnung der Bewertungssystematik im Handlungsbereich der Ressource Baustoffe.

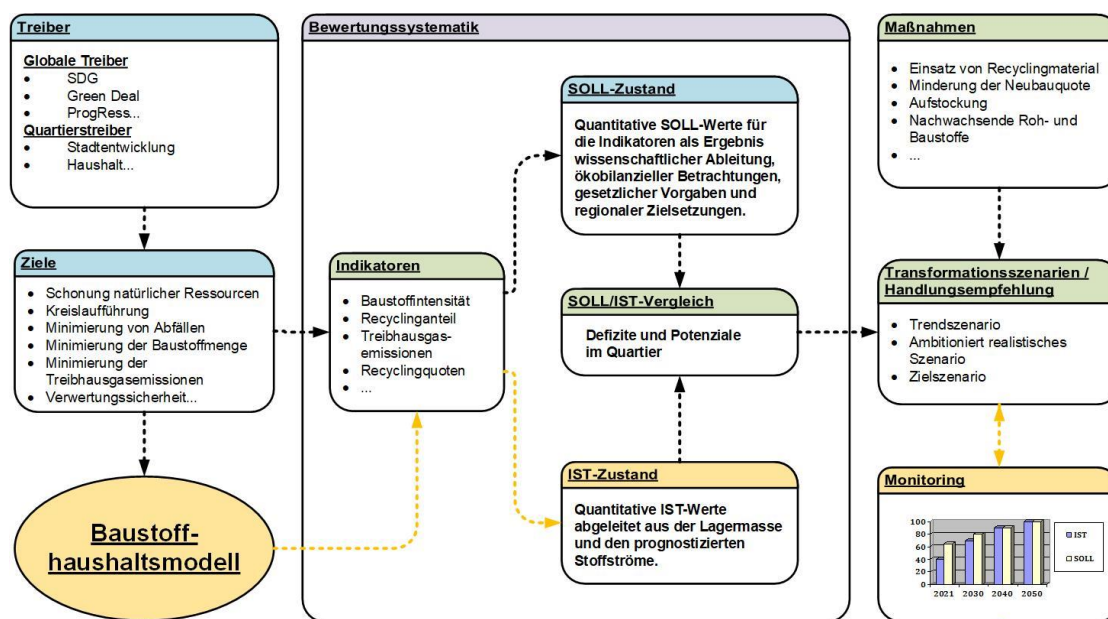


Abbildung 15. Bewertungssystematik im Handlungsbereich der Ressource Baustoffe (Eigene Darstellung)

Die Recherche und Analyse globaler und regionaler Treiber für eine nachhaltige Entwicklung im Hoch- und Tiefbau hat gezeigt, dass derzeit keine konkreten Indikatoren und Zielgrößen für die Ressource Baustoffe existieren, die eine integrale Bewertung auf Grundlage einer Nutzwertanalyse ermöglichen. Dazu wäre es erforderlich, einen Soll-Zustand zu beziffern, der aus globalen und regionalen Zielgrößen abgeleitet werden muss.

Die Schweiz kann in diesem Zusammenhang als Vorreiter gesehen werden. Mit der angestrebten 2000-Watt-Gesellschaft wird ein klares Ziel von 2000 Watt Primärenergiebedarf pro Person und Jahr formuliert. Dies wird mit Hilfe von Ökobilanzen für die einzelnen Bereiche überprüft und abgebildet. Um die jeweiligen Zielwerte zu erreichen, wird in den sogenannten 2000-Watt-Arealen u. a. auf energieintensive Baustoffe verzichtet, die zulässige Wohnfläche an die Personenanzahl geknüpft und häufig ein Mobilitätskonzept gelebt, welches ein eigenes Auto überflüssig macht. Dennoch stellt das 2000-Watt-Ziel bis 2050 eine Herausforderung dar, da ein großer Anteil des persönlichen Budgets bereits auf die öffentliche Infrastruktur entfällt; so werden laut dem 2000-Watt-Rechner in Zürich aktuell bereits 2500 Watt pro Person für die öffentliche Infrastruktur angesetzt (Stadt Zürich Gesundheits- und Umweltdepartement, 2021).

Eine systemisch-sektorale Bewertung des Betrachtungsgebiets zur Abbildung von Transformationsszenarien und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für Baustoffe erfordert den IST-Zustand des Betrachtungsgebiets. Mit Hilfe des Baustoffhaushaltsmodells (BHM), welches aktuell in einer laufenden Promotion an der FH Münster entwickelt wird, konnten zwei Quartiere in Herne objektbezogen, quantitativ und qualitativ abgebildet werden und somit der IST-Zustand abgeschätzt werden.

Die für die Bewertung der Baustoffe herangezogenen Indikatoren leiten sich aus anerkannten Bewertungssystemen, wie der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44 oder der DGNB-Zertifizierung für nachhaltige Gebäude bzw. Quartiere ab und sind Bestandteil regionaler und globaler Umweltschutzziele. Exemplarisch wird im Rahmen des Forschungsprojekts R2Q auf das Bewertungssystem der Ökobilanzierung zurückgegriffen.

Die eigentliche Bewertung erfolgt über den Ist-Soll-Vergleich, wobei der Soll-Wert für den jeweiligen Indikator explorativ auf Grundlage regionaler und globaler Treiber entwickelt werden muss.

Im Ergebnis kann das Quartier (IST) den Soll-Wert übersteigen, erfüllen oder unterschreiten. Daraus ergibt sich in Bezug auf den betrachteten Indikator ein Transformationsbedarf. So könnten über einen Soll-Wert z. B. die entstehenden Treibhausgasemissionen im Quartier pro Einwohner\*in für den Bereich Baustoffe im Hoch- und Tiefbau bewertet werden.

Darauf aufbauend können über geeignete Maßnahmen Transformationsszenarien für das Quartier entwickelt werden, um sich dem Soll-Wert anzunähern. Maßnahmen können dabei

u. a. der Einsatz von Recyclingmaterialien, eine Nachverdichtung, nachhaltige Mobilitätskonzepte oder Vorgaben im Ordnungsrecht sein.

## 5 Materiallager und Treibhausgasemissionen

Im Gebäudebereich liegt in den meisten Betrachtungen der Schwerpunkt der ökobilanziellen Bewertung auf dem Gebäudebetrieb, wodurch für die Bewertung des eigentlichen Bauwerks nur begrenzt Daten zur Verfügung stehen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2021, S. 1). Daher können die Ergebnisse der nachfolgenden Betrachtung des anthropogenen Materiallagers lediglich als erste Orientierungswerte eingestuft werden, die bei zukünftig besserer Datenlage überprüft und angepasst werden sollten.

### 5.1 Grundlagen Gebäude

Von der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) wurde 2021 ein Benchmark für die Beurteilung der Treibhausgasemissionen von Gebäudekonstruktionen veröffentlicht. Der Mittelwert aller Gebäude liegt demnach bei 8,7 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>a bezogen auf die Netto-Grundfläche (NGF) (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2021, S. 1). Dieser Wert basiert auf 50 Ökobilanzen zertifizierter Gebäude, bei denen es sich um 46 Bürogebäude sowie drei größere Mehrfamilienhäuser und einem Wohngebäude mit drei Geschossen handelte. Daher kann dieser Wert in erster Linie für neuere Bürogebäude herangezogen werden.

Die Treibhausgasemissionen für die Gebäudekonstruktion (Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung) bei Mehrfamilienhäusern liegt zwischen 12 bis 16 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) (Mahler et al., 2019, S. 48). Einfamilienhäusern können mit einem Wert zwischen 10 bis 14 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) (Mahler et al., 2019, S. 59) angesetzt werden.

Eine weitere Studie kommt bei der Berechnung eines durchschnittlichen Einfamilienhauses und einer Nutzungsdauer von 50 Jahren je nach Bauart auf 9,2 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) (Massivbau mit Verblendfassade), 8,6 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) (Massivbau mit Wärmedämmverbundsystem) und 2,7 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) (Holzständer-Bauweise). Der geringe Wert bei der Holzständer-Bauweise resultiert aus einer hohen Gutschrift für das Holz bei der Entsorgung, ohne diese liegt der Wert bei rund 4,8 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a). Bei den Gebäuden in Massivbauweise hat die Gutschrift mit rund 0,5 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) einen untergeordneten Einfluss auf das Gesamtergebnis (Cantauw et al., 2019, S. 196).

Bei der Betrachtung der (energetischen) Ertüchtigung der Gebäudekonstruktion im Bestand können ohne Berücksichtigung der bestehenden Gebäudekonstruktion zusätzlich Treibhausgasemissionen von 3 bis 5 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) bei Mehrfamilienhäusern und 3 bis 4 bzw. 5 bis



9 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>2</sup>Wfl.·a) je nach Gebäudestruktur (Baujahr, Vollgeschosse, Wohnfläche, etc.) veranschlagt werden (Mahler et al., 2019, S. 88) (Mahler et al., 2019, S. 97).

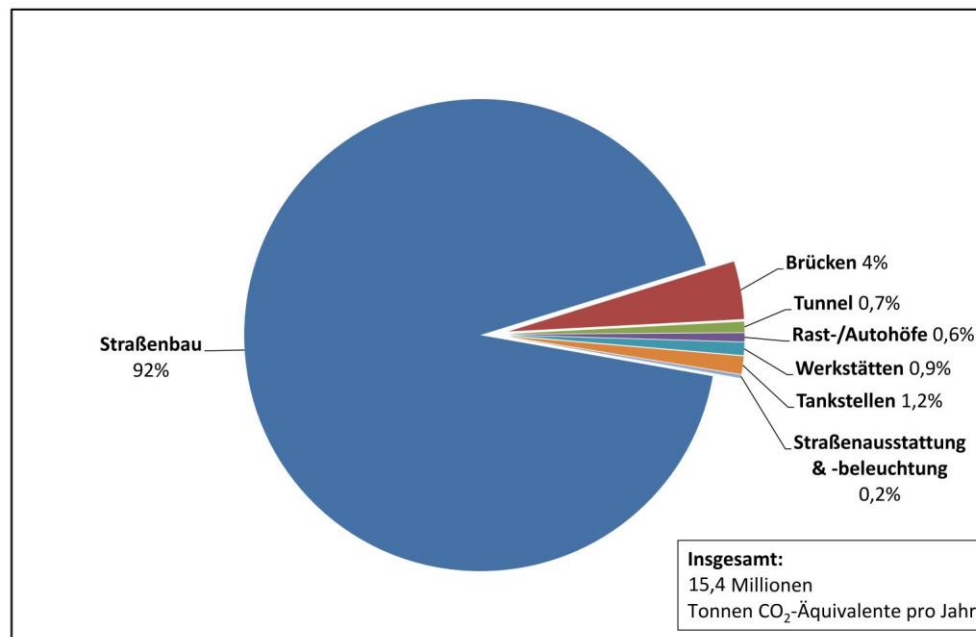
Bei diesen Angaben und Vergleichen ist immer zu berücksichtigen, dass die Berechnungsmethode der Wohnfläche in Deutschland nicht eindeutig festgelegt ist und grundsätzlich über drei Ansätze erfolgen kann. So steht für die Berechnung die Wohnflächenverordnung (*Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche*, 2003), die „Zweite Berechnungsverordnung“ (*Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen nach dem Zweiten Wohnungsbaugesetz*, 2022) oder die DIN 277 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2016) zur Verfügung. Je nach Berechnungsgrundlage und Wohnungsgrundriss können die Ergebnisse für die Wohnfläche deutlich voneinander abweichen. Da die genannten Studien keine Angaben zur Berechnungsgrundlage der Wohnfläche machen, wird die Wohnfläche der Netto-Grundfläche (NGF) bzw. Netto-Raumfläche (NRF) nach DIN 277 gleichgesetzt. In Bezug auf die DIN 277 kommt die NGF der Wohnfläche am nächsten (Brennecke, 2000).

Diese Annahme kann zu einer Überschätzung der Treibhausgasemissionen führen, da bei der NGF nach DIN 277 u. a. Dachschrägen, Balkon und Keller ohne Abzüge in die Berechnung einfließen. Bei der Berechnung nach Wohnflächenverordnung (*Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche*, 2003) werden hingegen Dachschrägen nur zu 50 %, der Balkon mit 25 % und der Keller überhaupt nicht berücksichtigt. Dies hat zu Folge, dass die Treibhausgase (THG) bei der Berechnung nach DIN 277 auf mehr m<sup>2</sup>-Wohnfläche verteilt werden, während das gleiche Gebäude auf Grundlage der Wohnflächenverordnung weniger m<sup>2</sup>-Wohnfläche und damit höhere THG pro m<sup>2</sup>-Wohnfläche hätte. Umgekehrt käme es zu einer potenziellen Unterschätzung der THG eines Gebäudes, daher ist eine Berücksichtigung der Berechnungsgrundlage für die Interpretation und Vergleichbarkeit erforderlich.

## 5.2 Grundlagen Straßen und Wege

Auch bei der Mobilität wird der Schwerpunkt der ökobilanziellen Betrachtungen häufig auf die Fahrzeuge sowie den Betrieb und nicht auf die dafür notwendige Infrastruktur gelegt, was sich aktuell auch beim Thema der Elektromobilität beobachten lässt.

Bei der Verkehrsinfrastruktur ist der Straßenbau mit 92 % der größte Verursacher der Treibhausgasemissionen. Die Abbildung 15 zeigt eine Übersicht der THGs der unterschiedlichen Bereiche.



**Abbildung 16. CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen durch den Bau und die Unterhaltung der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursacherguppen (Moritz Mottschall & Thomas Bergmann, 2013, S. 37)**

Beim Straßenbau entfallen rund 82 % der THG auf die Gewinnung und Herstellung der Baumaterialien. Die restlichen 18 % werden durch den Transport und den Energieverbrauch beim Einbau verursacht. Bei der genauen Betrachtung des Straßenkörpers verursacht die Deckschicht rund 42 % und die Tragschicht rund 58 % der THG, der Unterbau ist mit unter einem % vernachlässigbar (Moritz Mottschall & Thomas Bergmann, 2013, S. 39).

Der weitaus größte Teil der THG für die deutsche Straßenverkehrsinfrastruktur fällt mit 66 % auf den Asphalt, gefolgt von Naturstein mit rund 8 % und Beton mit rund 6 %, Schotter (0,2 %) Kies und Zement (je 1 %) spielen eine untergeordnete Rolle (Moritz Mottschall & Thomas Bergmann, 2013, S. 39).

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen wurde die Hochrechnung durch die spezifische Oberflächenbeschaffenheit erweitert.

### 5.3 Grundlagen Kanalisation

In der VDI Studie „Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau“ werden der Kanalisation (Kanalnetz und Kanalschächte) rund 18,5 % der Materialmenge für den jährlichen Erneuerungsbedarf im Tiefbau in Deutschland und rund 6 % der damit in Verbindung stehenden Treibhausgasemissionen zugeschrieben (Bergmann et al., 2015, S. 66).

Um das Thema der Treibhausgasemissionen auch in der Abwasserbewirtschaftung zu etablieren, wurde bereits 2014 durch die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) eine entsprechende Arbeitsgruppe eingerichtet. In einem ersten Arbeitsbericht wurden 2017 einige wichtige Aspekte der Abwasserwirtschaft und Treibhausgasemissionen veröffentlicht. Bis Ende 2022 lag der Entwurf für das Merkblatt DWA-M 230 „Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung“ zur Stellungnahme vor (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2021a, 2021b). Durch die hohe Komplexität des gesamten Systems bei der Abwasserableitung und -behandlung ist die Abschätzung klimaschädlicher Gase durch erhebliche Unsicherheiten geprägt. Die Bewertung betrachtet indirekte Emissionen (wie Energie- und Betriebsmittelverbrauch) und direkte Emissionen (Abgasvolumenströme). Die Herstellung und der Rückbau der Kanalisation (Bauaktivität) werden durch die untergeordnete Rolle der gebauten Infrastruktur in der Ausarbeitung nicht weitergehend berücksichtigt (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 2021a, S. 3). In Kapitel 5.4 werden dennoch die THG aus diesem Bereich angesetzt.

#### 5.4 Berechnung der Treibhauspotenziale in den Quartieren in Herne

Auf Grundlage von Kapitel 5.1 wird für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials im Gebäudebestand ein Wert von  $10 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a})$  herangezogen. Eine Differenzierung nach Gebäudeart wird nicht vorgenommen.

Für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials im Straßen- und Wegebestand kann auf verfügbare Informationen über die Oberfläche (daher Deckschicht) der Verkehrsfläche in den Quartieren zurückgegriffen werden. In dem Datensatz werden Asphalt, Pflaster, Platten, Naturstein sowie wassergebundene Verkehrsflächen unterschieden, wobei Letztere bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

Über die Verknüpfung der Materialien, der Masse bzw. der Fläche und  $\text{CO}_2\text{e}$ -Werten aus der ÖKOBAUDAT<sup>2</sup> (siehe: (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2022)) kann eine Abschätzung der THG vorgenommen werden. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Zusammenhänge aus den Materialangaben in Herne, den Angaben in der ÖKOBAUDAT und dem Treibhausgaspotenzial.

**Tabelle 6. Übersicht der Materialien im Straßen- und Wegebestand in Herne und den entsprechenden Daten aus der ÖKOBAUDAT (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2022)**

---

<sup>2</sup> vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken

Material (Herne)	Datensatz ÖKOBAUDAT	kg CO <sub>2</sub> e/Mg
Asphalt	Asphalttragschicht	71,8
Naturstein	Natursteinplatte	138,2
Pflaster	Betonpflastersteine	123,6
Platten	Betonpflastersteine	123,6

Für die Kanalisation (Haltung und Schächte) liegt aus der Berechnung des anthropogenen Materiallagers eine detaillierte Materialverteilung vor. Die zugrunde gelegte Konstruktionsdatenbank für die Hochrechnung bezieht sich ebenfalls auf die ÖKOBAUDAT, wodurch die Berechnung des Treibhauspotenzials durchgeführt werden kann.

Die angesetzte Nutzungsdauer zur Berechnung einer jährlichen Verteilung der gesamten Treibhauspotenziale beträgt bei der Kanalisation 100 Jahre. Für Gebäude sowie Straßen und Wege wurden 50 Jahren angesetzt. Tabelle 7 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen der Beispiel-Quartiere für die unterschiedlichen Bereiche.

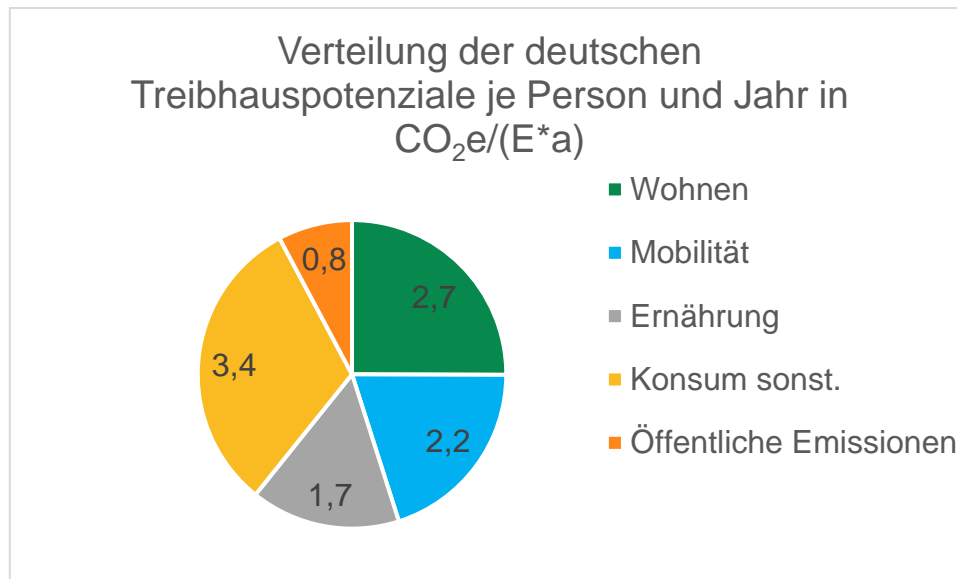
**Tabelle 7. Übersicht der jährlichen Treibhausgasemissionen für die einzelnen Sektoren in den Beispiel-Quartieren (Eigene Berechnungen)**

Bereich (Nutzungsdauer)	THG – Strünkede [Mg CO <sub>2</sub> e/a]	THG- Pantringshof [Mg CO <sub>2</sub> e/a]
Gebäude (50 Jahre)	2733	1283
Straßen und Wege (50 Jahre)	381	186
Kanalisation (100 Jahre)	13	6
Summe	3127	1475

## 5.5 Plausibilitätsprüfung

Im Folgenden werden die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft, dabei liegt der Anspruch nicht auf der Beweisführung der Richtigkeit, es soll eher überprüft werden, ob die Zahlen im Vergleich mit anderen Veröffentlichungen grundsätzlich als plausibel angesehen werden können.

Die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen (THG) pro Person und Jahr liegen in Deutschland bei 10,8 Mg CO<sub>2</sub>e pro Person und Jahr. Der Bereich Wohnen hat daran einen Anteil von 2,2 Mg CO<sub>2</sub>e und damit rund 20 %. Darin enthalten sind auch die Treibhausgasemissionen für die Nutzung des Gebäudes, wie Strom und Wärme, welche je nach Gebäude einen unterschiedlich hohen, aber den größten Anteil an den THG-Emissionen gegenüber der Gebäudekonstruktion in dem Bereich ausmacht (Umweltbundesamt, 2022). Abbildung 16 zeigt die Verteilung der unterschiedlichen Bereiche.



**Abbildung 17. Verteilung der deutschen Treibhauspotenziale je Person und Jahr in  $\text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  (Eigene Darstellung nach (Umweltbundesamt, 2022))**

Dem öffentlichen Bereich in Deutschland werden 0,8 Mg  $\text{CO}_2\text{e}$  pro Person und Jahr zugeschrieben. Dies beinhaltet auch die Treibhausgaspotenziale der öffentlichen Abwasserinfrastruktur sowie des Straßen- und Wegenetzes. (Umweltbundesamt, 2022)

Tabelle 7 zeigt die Verteilung der THG-Emissionen aus Tabelle 6 bezogen auf die Bevölkerung der Quartiere.

**Tabelle 8. Übersicht der Quartiere in Hinsicht der Treibhauspotenziale pro Person (Eigene Berechnungen)**

Quartier	THG [Mg $\text{CO}_2\text{e}/\text{a}$ ]	Bevölkerung [E]	THG pro Person [kg $\text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$ ]
Herne-Strünkede	3.127	5.527	566
Herne- Pantringshof	1.475	1.892	780

Demnach verursacht das anthropogene Materiallager in Herne-Strünkede ein Treibhauspotenzial von  $566 \text{ kg}^*\text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$ . In Pantringshof liegt das Treibhauspotenzial mit  $780 \text{ kg}^*\text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  über dem Wert in Strünkede, was auf die Bebauungsstruktur zurückzuführen ist.

Im Mittel kann für die beiden Quartiere mit  $673 \text{ kg}^*\text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  gerechnet werden. Dies entspricht 6,2 % der durchschnittlichen deutschen Treibhausgasemissionen, von  $10,8 \text{ Mg } \text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  (Umweltbundesamt, 2022). Vergleicht man diesen Wert mit den Angaben in Abbildung 16, zeigt sich, dass hier öffentliche Emissionen von  $0,84 \text{ Mg } \text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  und für den Bereich Wohnen  $2,7 \text{ Mg } \text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$  angenommen werden. Dies ergibt  $3,54 \text{ Mg } \text{CO}_2\text{e}/(\text{E}^*\text{a})$

und damit rund ein Drittel der durchschnittlichen deutschen Treibhausgasemissionen. Berücksichtigt man nur dieses Drittel, hat das anthropogene Materiallager (in den betrachteten Bereichen) mit  $673 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2\text{e}/(\text{E} \cdot \text{a})$  einen Anteil von rund einem Fünftel der Treibhauspotenziale in dem Bereich Wohnen und öffentliche Emissionen.

Die Auflistung und Gegenüberstellung zeigt, dass die ermittelten Werte für die Treibhauspotenziale in einem plausiblen Bereich liegen. Der Gesamtanteil von 19 % für das anthropogene Materiallager an dem gesamten Bereich Wohnen und öffentliche Emissionen liegt in einem realistischen Verhältnis. Da in der Studie lediglich die Verkehrswege sowie die Kanalisation berücksichtigt werden und ein Großteil z. B. die Infrastruktur der Energieversorgung oder auch Schienenverkehr nicht berücksichtigt sind, ist das Ergebnis eher als etwas zu hoch anzusehen.

# III. Anhang

## Literaturverzeichnis

- American Institute of Architects (AIA) (Hg.) *AIA Document G202™ - 2013: Project Building Information Modeling Protocol Form* [Online]. Verfügbar unter <https://content.aia.org/sites/default/files/2016-09/AIA-G202-2013-Free-Sample-Preview.pdf> (Abgerufen am 17 Februar 2022).
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (2022) (AdV) (Hg.) *Standards und Produktblätter der Zentralen Stelle Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle (ZSHH)* Testdatensatz Hausumringe Deutschland [Online]. Verfügbar unter <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Standards-und-Produktblaetter/ZSHH/> (Abgerufen am 18 Februar 2022).
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (Hg.) (2018) *ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM* [Online]. Verfügbar unter <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/nav/a63/binarywriterservlet?imgUid=9201016e-7efa-8461-e336-b6951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111> (Abgerufen am 19 Mai 2021).
- Augiseau, V. & Barles, S. (2016) „Studying construction materials flows and stock: A review“, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 123, S. 153–164.
- Baccini, P. & Bader, H.-P. (1996) *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*, Heidelberg, Berlin, Oxford, Spektrum Akademischer Verlag.
- Berger, C. & et al. „Zustand der Kanalisation in Deutschland: Ergebnisse der DWA-Umfrage 2020“, *Sonderdruck aus KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Vol. 67., 12/2020, S. 939–953 [Online]. Verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/umfrage-zum-zustand-der-kanalisation-in-deutschland.html>.
- Bergmann, T., Bleher, D. & Jenseit, W. (2015) *Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau: Materialaufwendungen und technische Lösungen* [Online]. Verfügbar unter [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/Studie\\_Ressourceneffizienzpotenziale\\_im\\_Tiefbau.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf) (Abgerufen am 17 Dezember 2018).
- BIMForum (Hg.) (2013) *LEVEL OF DEVELOPMENT SPECIFICATION: For Building Information Models* [Online]. Verfügbar unter <https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2013/09/2013-lod-specification.pdf> (Abgerufen am 17 Februar 2022).
- Birat, J.-P., Daigo, I. & Matsuno, Y. (2014) „Methods to Evaluate Environmental Aspects of Materials“, in Seetharaman, S., McLean, A., Guthrie, R. & Sridhar, S. (Hg.) *Industrial processes*, Amsterdam, Elsevier, S. 1459–1505.



- Brennecke, H. (2000) „Wohnflächenberechnung nach DIN 277“, *Brennecke und Partner*, 1. Januar [Online]. Verfügbar unter [https://www.brennecke-rechtsanwaelte.de/Wohnflaechenberechnung-nach-DIN-277\\_260](https://www.brennecke-rechtsanwaelte.de/Wohnflaechenberechnung-nach-DIN-277_260) (Abgerufen am 29 April 2022).
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (Hg.) (2021) *Digitales Basis-Landschaftsmodell (Ebenen) (Basis-DLM)* [Online]. Verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-basis-landschaftsmodell-ebenen-basis-dlm-ebenen.html>.
- Bundesminister für Verkehr (Hg.) (1991) *Verkehr in Zahlen 1991* [Online], Berlin. Verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen\\_1991-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_1991-pdf.pdf?__blob=publicationFile) (Abgerufen am 8 September 2022).
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BBSR) (2022) (Hg.) *ÖKOBAUDAT: Produktkategorien* [Online]. Verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/service/downloads.html> (Abgerufen am 18 Februar 2022).
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hg.) (2019) *Baufachliche Richtlinien Abwasser: Arbeitshilfen zu Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes* [Online]. Verfügbar unter <https://bfr-abwasser.de/html/index.html> (Abgerufen am 26 März 2021).
- Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (bbs) (Hg.) (2023) *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020* [Online], Berlin, Kreislaufwirtschaft Bau. Verfügbar unter <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf>(Abgerufen am 21 Februar 2023).
- Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (bbs) (Hg.) (2020) *bbs-Zahlenspiegel 2020: Daten und Fakten zur Baustoff-Steine-Erden-Industrie* [Online], Berlin. Verfügbar unter [https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user\\_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Konjunktur/2020-06-11\\_BBS\\_Zahlenspiegel.pdf](https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Konjunktur/2020-06-11_BBS_Zahlenspiegel.pdf) (Abgerufen am 17 Februar 2022).
- Cantau, C, Caplan, A & Timm, E (Hg.) (2019) *Housing the family: Locating the single-family home in Germany*, Berlin, Jovis.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (Hg.) (2021) *BENCHMARKS FÜR DIE TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER GEBÄUDEKONSTRUKTION: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden* [Online]. Verfügbar unter [https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021\\_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf](https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf) (Abgerufen am 21 April 2022).
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2021a) *Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung: Teil 1: Direkte Treibhausgasemissionen –*

*Messen und Bewerten* [Online], Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. Verfügbar unter <https://webshop.dwa.de/de/dwa-m-230-1-10-2021.html>.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2021b) *Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung: Teil 2: Motivation und Vorgehen zur Erstellung von CO<sub>2</sub>e-Bilanzen*“, Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2016) 277: *Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen*, Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2018) 276: *Kosten im Bauwesen*, Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2014) *Verkehr in Zahlen: 2014/2015* [Online], 42. Aufl., Hamburg, Dt. Verkehrs-Verl. Verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen\\_2014-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2014-pdf.pdf?__blob=publicationFile) (Abgerufen am 8 September 2022).

Mahler, B.; Idler, S.; Nusser, T.; Gantner, J. (2019) *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus* [Online] (132/2019). Verfügbar unter <https://www.re-source.com/wp-content/uploads/2019/11/UBA-2019-Energieaufwand-Gebaeudekonzepte.pdf> (Abgerufen am 25 April 2022).

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen*, Köln: FGSV Verlag GmbH.

Görg, H. (1997) *Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen* (Dissertation), Darmstadt.

Knappe, F. & Reinhardt, J. (2015) *Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung* [Online]. Verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3712\\_33\\_324\\_primaerrohstoffe\\_strassenbau\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3712_33_324_primaerrohstoffe_strassenbau_bf.pdf) (Abgerufen am 18 Dezember 2019).

Kohler, N., Hassler, U. & Paschen, H. (1999) *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen*, Berlin, Heidelberg, s.l., Springer Berlin Heidelberg.

LARSIM-Entwicklergemeinschaft - Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU (Hg.) (2021) *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele* [Online]. Verfügbar unter <https://larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf> (Abgerufen am 14 April 2022).

- Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR) (Hg.) *Physis der gebauten: Umwelt Informationsportal zu Bauwerksdaten* [Online]. Verfügbar unter <http://ioer-bdat.de/>.
- Link, H. (2013) „Den Gesetzen der Physik und dem Wohle der Menschen dienen: Interview mit Werner Sobek“, *Deutsches Ingenieurblatt*, 07-08/2013, S. 10–13 [Online]. Verfügbar unter <https://www.deutsches-ingenieurblatt.de/magazin/archiv/archiv-deutsches-ingenieurblatt/artikel/2013/dib-7-2013/2600-den-gesetzen-der-physik-und-dem-wohle-der-menschen-dienen-interview-mit-werner-sobek/>.
- Löwner, M. & et al. (2012) „CityGML 2.0: Ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle Teil 1: Datenmodell“, *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Vol. 137, No. 6, S. 4–40 [Online]. Verfügbar unter [https://geodaesie.info/system/files/privat/zfv\\_2012\\_6\\_Loewner\\_et-al\\_Teil-1.pdf](https://geodaesie.info/system/files/privat/zfv_2012_6_Loewner_et-al_Teil-1.pdf) (Abgerufen am 18 Februar 2022).
- Mahler, B., Idler, S. & Gantner, J. (2019) *Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung: Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung* [Online]. Verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.pdf;jsessionid=075CEF2511EDDBAD941726F77995EDEA.live11294?\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.pdf;jsessionid=075CEF2511EDDBAD941726F77995EDEA.live11294?_blob=publicationFile&v=1) (Abgerufen am 17 Februar 2022).
- Moritz Mottschall & Thomas Bergmann (2013) *Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland* [Online], Institut für angewandte Ökologie e.V. Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte\\_96\\_2013\\_treibhausgasemissionen\\_durch\\_infrastruktur\\_und\\_fahrzeuge\\_2015\\_01\\_07.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_96_2013_treibhausgasemissionen_durch_infrastruktur_und_fahrzeuge_2015_01_07.pdf) (Abgerufen am 14 Januar 2019).
- Schiller, G., Steger, S., Reichenbach, J., Ortlepp, R., Krauß, N., Schütz, H., Fernandes, J. A., Wagner, J. & Baumann, J. (2015) *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft* [Online]. Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_83\\_2015\\_kartierung\\_des\\_anthropogenen\\_lagers.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf) (Abgerufen am 17 Februar 2022).
- Stadt Herne - Fachbereich Vermessung und Kataster (Hg.) (2020) *Stadtteilprofile Herne: Statistische Bezirke 2019* [Online], Herne. Verfügbar unter [https://www.herne.de/PDF/Stadtfakten/Statistik/Stadtteilprofil/stadtteilprofile\\_2019.pdf](https://www.herne.de/PDF/Stadtfakten/Statistik/Stadtteilprofil/stadtteilprofile_2019.pdf) (Abgerufen am 24 August 2022).
- Stadt Zürich Gesundheits- und Umweltsdepartement (Hg.) (2021) *2000-Watt-Rechner: Welcher Energietyp sind Sie?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/>

[index/umwelt\\_energie/2000-watt-gesellschaft/energierechner.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html) (Abgerufen am 23 Juni 2021).

Statista Research Department (Hg.) (2022) *Bevölkerung - Zahl der Einwohner in Deutschland von 2010 bis 2021* [Online]. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1217/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-seit-2002/>.

Statistisches Bundesamt (2022) *Abfallbilanz 2020* [Online] (Umwelt). Verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html> (Abgerufen am 4 Februar 2022).

Stretz, C. (2020) *RessourcenPlan im Quartier – Baustoffe: Methodenentwicklung für ein kommunales Haushaltsmodell für Baustoffe im Hoch- und Tiefbau* (Poster), Technischen Universität Dresden.

Stretz, C. (2022) „*Level of Specification*“ (LoS) zur Abbildung anthropogener Materiallager (Poster), Technischen Universität Dresden.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2022) *CO<sub>2</sub>-Rechner des Umweltbundesamtes* [Online], Institut für Energie- und Umweltforschung and KlimAktiv Consulting mbH. Verfügbar unter [https://uba.CO<sub>2</sub>-rechner.de/de\\_DE/living-hs#panel-calc](https://uba.CO2-rechner.de/de_DE/living-hs#panel-calc) (Abgerufen am 3 Mai 2022).

(2022) *Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen nach dem Zweiten Wohnungsbaugesetz* (Zweite Berechnungsverordnung - II. BV).

(2003) *Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche* ((Wohnflächenverordnung - WoFIV)).

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Anthropogenes Materiallager in Deutschland für das Jahr 2010 in Mrd. Mg (eigene Darstellung nach Zahlen aus (Schiller et al., 2015, 80-86; 114-116)) .....	5
Abbildung 2.	Die methodischen Ansätze Top-Down und Bottom-Up zur Erhebung von Beständen (Eigene Abbildung, Erstveröffentlichung (Stretz, 2020)) .....	6
Abbildung 3.	Übersicht der Level of Specification (LoS) bei der Modellierung anthropogener Materiallager und Stoffströme, mit Teilbereichen sowie den jeweiligen Anwendungsfällen (Stretz, 2022).....	9
Abbildung 4.	Schritte des Baustoffhaushaltsmodells (Eigene Darstellung nach (Stretz, 2020)) .....	10
Abbildung 5:	Beschreibung der topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat auf der Grundlage der Festlegungen des ATKIS®-Objektartenkatalogs (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2021).....	11
Abbildung 6.	Testdatensatz einiger Hausumringe der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map) (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2022) .....	12
Abbildung 7.	Verschneidung der Grundrisse mit der Gebäudehöhe aus den LOD-Modell (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map) .....	13
Abbildung 8.	Links: Straßenflächen auf Basis interner Daten der Stadt Herne. Rechts: Straßenlinien aus dem ATKIS Basis DLM (Eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map).....	15
Abbildung 9.	Relative Zahlen der Altersstruktur in Deutschland für die Gemeinde- und Kreisstraßen (Eigene Darstellung basierend auf (Bundesminister für Verkehr, 1991; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2014)) .....	16
Abbildung 10.	Gegenüberstellung verschiedener Proben eines Straßenabschnitts (aus Kernlochbohrungen) in Herne mit einem Regelquerschnitt nach RStO 12 (angegebenes Material ist in RStO nicht aufgelistet, Abbildung bezieht sich nur auf die Schichtdicken von Deck-, Binder-, Trag- und Frostschuttschicht) (Eigene Darstellung) .....	17
Abbildung 11.	Haltungen und Schächte für einen Quartiersauschnitt in Herne (eigene Darstellung hinterlegt mit Open Street Map).....	19
Abbildung 12.	Aufbau eines Kanalschachts (links) und einer Haltung (rechts) mit den einzelnen Funktionseinheiten (eigene Darstellung) .....	19
Abbildung 13.	Gegenüberstellung der Materiallager in Herne-Strünkede für den Hoch- und Tiefbau (Eigene Darstellung) .....	20
Abbildung 14.	Übersicht über die Materialverteilung im anthropogenen Materiallager in den beiden Quartieren in Herne. (Eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 15.	Bewertungssystematik im Handlungsbereich der Ressource Baustoffe (Eigene Darstellung).....	26
Abbildung 16.	CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen durch den Bau und die Unterhaltung der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergруппen (Moritz Mottschall & Thomas Bergmann, 2013, S. 37) .....	30
Abbildung 17.	Verteilung der deutschen Treibhauspotenziale je Person und Jahr in CO <sub>2</sub> e/(E*a) (Eigene Darstellung nach (Umweltbundesamt, 2022)) .....	33

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Übersicht der Gebäudeanzahl in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnungen) .....	14
Tabelle 2.	Übersicht über die Verkehrsflächen in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnungen) .....	17
Tabelle 3.	Übersicht der Schächte und Haltungslängen in den betrachteten Quartieren (Eigene Berechnung) .....	20
Tabelle 4.	Übersicht der Massenverteilung und Massenrelationen für die Betrachtungsfelder in den beiden Quartieren (Eigene Berechnungen) .....	21
Tabelle 5.	Gegenüberstellung der Massenberechnung im Hoch- und Tiefbau in Megagramm pro Einwohner*in in den Quartieren und Vergleich mit den Ergebnissen aus der Studie KartAL I. (Eigene Berechnung mit Zahlen aus (Schiller et al., 2015; Stadt Herne - Fachbereich Vermessung und Kataster, 2020; Statista Research Department, 2022) .....	22
Tabelle 6.	Übersicht der Materialien im Straßen- und Wegebstand in Herne und den entsprechenden Daten aus der ÖKOBAUDAT (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2022) .....	31
Tabelle 7.	Übersicht der jährlichen Treibhausgasemissionen für die einzelnen Sektoren in den Beispiel-Quartieren (Eigene Berechnungen) .....	32
Tabelle 8.	Übersicht der Quartiere in Hinsicht der Treibhauspotenziale pro Person (Eigene Berechnungen) .....	33