Strategische Erfassung der Sekundärressourcen basierend auf Ökobilanzen und einem Geoinformationssystem am Beispiel von drei Wohngebieten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Ruhr-Universität Bochum

von
Karina Krause

Bochum, Januar 2020

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing Annette Hafner
Prof. Dr. rer. nat. Harro Stolpe

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein Dank gilt zunächst Frau Prof. Dr. – Ing. Annette Hafner, meiner Doktormutter, für die Betreuung dieser Arbeit, der freundlichen Hilfe und der vielfachen Ideengebung, die mir einen kritischen Zugang zu dieser Thematik eröffnete. Die zahlreichen Gespräche auf intellektueller und persönlicher Ebene werden mir immer als bereichernder und konstruktiver Austausch in Erinnerung bleiben. Ich habe unsere Dialoge stets als Ermutigung, Motivation und Inspiration empfunden.

Ich danke Herrn Prof. Dr. rer. nat. Harro Stolpe für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Mein außerordentlicher Dank gilt Özlem Özdemir und Caya Zernicke, ohne deren mühevolle und liebevolle Unterstützung ein solcher Arbeitsumfang niemals hätte gelingen können. Des Weiteren möchte ich mich bei Sabrina Schäfer für die Durchsicht dieser Dissertation, ihre kritischen Betrachtungen, ihre differenzierten Anmerkungen sowie die zweckdienlichen Diskussionen, bedanken. Tief verbunden und dankbar bin ich Kathrin Hoffmann für ihre unglaublich hilfreiche Unterstützung nicht nur bei der Anfertigung dieser Dissertation, sondern über die gesamte Studienzeit sowie vor allem ihr moralischer Beistand.

Mein ganz besonderer Dank aber gilt meiner Familie die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten und denen ich diese Arbeit widme.

KURZFASSUNG

Die Kritikalität von natürlichen Ressourcen steht seit Jahren an der Spitze der Diskussionen um den Klimawandel. Die Gewinnung von Primärressourcen geht mit hohen Energie-, Material- und Chemikalieneinsatz sowie einer hohen Schadstoffemission einher. Insbesondere bei den materiellen Ressourcen und deren Endlichkeit in natürlichen Vorkommen ist ein Umdenken der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Zukünftige Quellen von Ressourcen sind anthropogene Lagerstätten, wozu unter anderem die gebaute Umwelt, hier im speziellen Wohngebäude, zählt.

Ziel der durchgeführten Untersuchung war daher eine strategische Erfassung von Materialien von Wohngebäuden und die Potenzialanalyse und die Nutzung Sekundärressourcen sowie die Kartierung an ausgewählten Untersuchungsgebieten.

Hierfür wurden die in der Literatur vorhandenen Daten für Bestandsbauten analysiert und mit einer Sensitivitätsuntersuchung durch Berechnungen auf Basis real existierender Gebäude verifiziert. Potenzielle Schadstoffbelastungen wurden in Gebäuden als ein entscheidendes Hemmnis bei der Sekundärressourcennutzung dargelegt. Die wohngebäudetypischen Schadstoffe wurden der Baugeschichte sowie rechtlichen Rahmenbedingungen, entsprechend den Bauepochen, zugeordnet.

Neubauten wurden auf Basis von Gebäudeökobilanzen untersucht. Eine Vielzahl an Gebäudeökobilanzen ermöglichte die Erstellung einer Datenbank mit Detailinformationen hinsichtlich der Materialmassen. Die Umweltindikatoren Primärenergie, unterteilt in erneuerbare Primärenergie und nicht erneuerbare Primärenergie, sowie das Treibhausgaspotenzial wurden zugrunde gelegt, um das Recyclingpotenzial zu quantifizieren.

Die Kartierung wurde Geoinformationssystem-basiert durchgeführt. Die genannten Aspekte Materialmengen, Schadstoffbelastungen und Recyclingpotenziale, wurden gebäudetypspezifisch anhand von drei Untersuchungsgebieten systematisch erfasst.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass Wohngebäude ein hohes Maß an Potenzial gewähren Sekundärressourcen bereit zu stellen. So beinhaltet beispielsweise ein neugebautes mineralisches Mehrfamilienhaus im Durchschnitt 3000 Tonnen an Materialien. Hier raus ergibt sich ein Recyclingpotenzial von 1.989.033 MJ Primärenergie in Form von substituierter Primärenergie durch Sekundärmaterialien bzw. Sekundärbrennstoffen. Durch die Anwendung des Geoinformationssystems konnte eine strukturierte Informationssammlung bereitgestellt werden sowie eine exakte räumliche Verordnung und Verteilung der Daten erfolgen.

Die strategische Erfassung der Sekundärressourcen von Wohngebäuden bedarf einer fortlaufenden Erweiterung der Datengrundlagen sowie einer Automatisierung der Erfassung von Gebäudeinformationen, beispielsweise durch die voranschreitende Entwicklung von Building-Information-Modeling-Systeme, damit dieses Potenzial in Zukunft genutzt werden kann.

ABSTRACT

The criticality of natural resources has been at the forefront of the climate change debate for years. The extraction of primary resources is associated with high energy, material and chemical inputs and high pollutant emissions. Especially regarding regard to material resources and their finiteness in natural deposits, a rethinking of the entire value chain is necessary. Future sources of resources are anthropogenic deposits, including the built environment, in this case in particular residential buildings.

Therefore, the aim of the study was a strategic survey of materials from residential buildings and the analysis of their potential as secondary resources as well the mapping of selected study areas.

For this purpose, the data available in the literature for existing buildings were analyzed and verified with a sensitivity study by calculations based on real existing buildings. Potential pollutant loads in buildings were presented as a decisive obstacle in the use of secondary resources. Pollutants typical for residential buildings were assigned to building history and legal regulations according to the construction period.

New buildings were examined on the knowledge of building life cycle assessment. A large number of building life cycle assessments made it possible to create a database with detailed information regarding material masses. The environmental indicators primary energy, divided into renewable primary energy and non-renewable primary energy, as well as the greenhouse gas potential were used to quantify the recycling potential.

The mapping was carried out using a Geographic Information System. The above-mentioned aspects of material quantities, pollutant loads and recycling potentials were systematically recorded for each building type based on three study areas.

Overall, it residential buildings provide a high degree of potential to usage as secondary resources. For example, a newly built mineral apartment building contains an average of 3,000 tonnes of materials that show a recycling potential of 1,989,033 MJ of primary energy in the form of substituted primary energy by secondary materials or secondary fuels. The application of the Geographic Information System made it possible to provide a structured collection of information as well as an exact spatial regulation and distribution of the data.

The strategic recording of secondary resources of residential buildings requires a continuous expansion of the data basis as well as an automation of the recording of building information, for example through the advancing development of Building Information Modelling systems, so that this potential can be used in the future.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung **5**

Abstract **7**

1 Einleitung **12**
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 12
1.2 Arbeitshypothese, Forschungsfrage und Zielsetzung 13
1.3 Aufbau der Arbeit 14

2 Stand der Forschung und Entwicklung **15**

3 Methodik **18**

4 Bestimmung spezifischer Materialkennwerte für unterschiedliche Gebäudekategorien **20**
4.1 Allgemeines 20
4.2 Gebäudetypologie 21
4.3 Methoden der Bestimmung von Materialkennwerte für Bestandsbauten 23
4.3.1 Spezifische Materialkennwerte Bestandsgebäude 28
4.3.2 Vergleich der Stoffintensität 31
4.4 Methode der Bestimmung von spezifischen Materialkennwerten für Neubauten 35
4.4.1 Einfamilienhäuser und Zweifamilienhäuser 36
4.4.2 Mehrfamilienhäuser 36
4.4.3 Spezifische Materialkennwerte Neubauten 39

5 Schadstoffe **43**
5.1 Gesetzliche Grundlagen 43
5.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz 44
5.1.2 Abfallverzeichnis-Verordnung 44
5.1.3 Gewerbeabfallverordnung 45
5.1.4 Altholzverordnung 45
5.1.5 Nachweisverordnung 46
5.2 Schadstoffe in Wohngebäuden 46
5.2.1 Mineralfasern 47
5.2.2 Organische Schadstoffe 49
5.2.3 Schwermetalle 54
5.2.4 Biologische Schadstoffe 55
5.3 Sonderfall Brandschaden 55
5.4 Zuordnung von Schadstoffen in Baualtersklassen der Wohngebäude nach IWU 56
5.5 Gewichtung der Gebäudeschadstoffe 62

6 Analyse der Recyclingpotenziale auf Produkt – und Gebäudeebene **64**
6.1 Allgemeines 64
6.2 Rahmenbedingungen der Gebäudeökobilanz; Lebenszyklusabschnitte und Datengrundlage 64
6.3 Analyse des Recyclingpotenzials auf Produktebene 68
6.4 Analyse des Recyclingpotenzials auf Gebäudeebene 69
6.4.1 Indikator Primärenergie 71
6.4.2 Anteile der Entsorgungsszenarien am Indikator PERE/PENRE 73
6.4.3 Indikator Treibhauspotenzial 78
6.4.4 Anteile der Entsorgungsszenarien am Indikator THG 79
6.4.5 Spezifische und generische Datensätze 81

7 GIS-basierte Datenerfassung und Visualisierung der Material- und Potenzialinformationen am Beispiel ausgesuchter Untersuchungsgebiete **83**
7.1 Untersuchungsgebiete 83

7.2 Vorgehen 84
7.3 Ergebnisse 86
7.3.1 Gebäudestruktur 86
7.3.2 Materialintensitäten 89
7.3.3 Potenzielle Schadstoffbelastung 95
7.3.4 Recyclingpotenziale 98
7.4 Auswertung 101
7.5 Potenzielle weitere Anwendungsgebiet 102

8 Zusammenfassung und Fazit 103

Abbildungsverzeichnis 105

Tabellenverzeichnis 107

Literaturverzeichnis 108

Anhang 115

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In der Bevölkerung werden Umwelt-, Klima und Energiefragen als die wichtigsten Aufgaben für Deutschland gesehen (Statista GmbH 2019). Das neue Klimapaket der Bundesregierung ist verabschiedet und legt neue Ziele für das Jahr 2030 fest. Deutschland hat sich mit anderen europäischen Ländern darauf geeinigt in Europa den Treibhausgasausstoß bis 2030 um mindestens 40% gegenüber 1990 zu senken sowie eine Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen (Europäische Kommission).

Im Rahmen der Diskussion um den Klimaschutz und die entsprechenden Maßnahmen wird die nachhaltige Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen genannt, da es einen weltweiten Rückgang der Ressourcendepots und im Gegensatz dazu aber eine weltweit steigende Nachfrage gibt (European Commission 2019). In Europa wurde der „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ erarbeitet, in dem Vorgehen zur Steigerung der Ressourcenproduktivität vorgeschlagen werden. Unter anderem soll das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung entkoppelt werden. Als Leitinitiative wird die Ressourceneffizienz mit dem Ziel der „Kreislaufwirtschaft“ benannt, die von einer Recyclinggesellschaft erreicht werden soll. (Europäische Kommission 2011, 2015)

Die traditionelle lineare Wirtschaft, die auf Nehmen - Machen - Verbrauchen und Entsorgen (Europäische Kommission 2014) basiert, hat den sogenannten "anthropogenen Bestand" geschaffen. Die anthropogenen Stoffflüsse sind bei einer gleichen oder sogar größeren Menge angekommen als die natürlichen Flüsse (Müller et al. 2017). Dies führt zu einer Verschiebung des Interesses von den natürlichen Ressourcen zum anthropogenen Bestand (Urban Mining). In städtischen Gebieten besteht der anthropogene Bestand aus Gebäuden, Verkehrsinfrastruktur, Produktionskapazität und langlebigen Gütern (Baas et al. 2010; Brunner und Rechberger 2004). Wobei der Gebäudebestand (ohne Senke) als der größte Materialbestand identifiziert wurde (Rechberger und Clement 2011). Dies ist insofern plausibel, da das Bauwesen nach (Krausmann et al. 2009) die weltweit höchste Rohstoffgewinnungsrate aufweist. Der zweite wichtige Aspekt im Bauwesen betrifft die Abfallwirtschaft, da der Bau- und Abbruchabfall etwa 25% bis 30% aller Abfälle in der EU erzeugt. Um die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen weiter zu unterstützen, betrachtet die EU den Bau- und Abbruchabfall als vorrangigen Abfallstrom mit hohem Potenzial für Wiederverwendung und Recycling (European Commission 2011).

Daher ist in der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98 / EG das Mindestziel für die Wiederverwendung in Höhe von 70% (nach Gewicht) bis 2020 festgelegt. Erreicht werden soll, die durch Vorbereitung des Bau- und Abbruchabfall für die Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung von ungefährlichem Bau- und Abbruchabfall. (Europäische Kommission 2019)

In Deutschland wurde das EU-Ziel bereits erreicht, es besteht jedoch noch weiterer Handlungsbedarf, um eine wachsende Recyclinggesellschaft zu erreichen.

Da Ressourcenmanagement im Einklang mit Ressourcenschutz und Kreislaufwirtschaft steht, ist ein zuverlässiges Managementsystem unerlässlich. Innerhalb des Urban-Mining-Konzepts ist ein systematisches Managementsystem vorgesehen, das der Kreislaufwirtschaft entspricht (Cossu 2013). Dieses Konzept fordert Informationen über Materialarten und Materialmengen. Daher muss der Bestand analysiert und ein „Kataster der Sekundärressourcen“ geschaffen werden, der die folgenden Informationen enthält: Standort, Ströme und Bestände, Dichte, Speziation, Partnerelemente und dissipative Verluste (Brunner 2011). Die Materialflussanalyse (MFA) und die Stoffflussanalyse (SFA) bieten eine geeignete Methode zur Charakterisierung von Materialbeständen und -flüssen in Gebäuden innerhalb geografischer- und zeitlicher Grenzen. Während MFA verwendet wird, um zusammengesetzte Flüsse verschiedener Materialien zu identifizieren, wird SFA angewendet, wenn bestimmte Substanzen untersucht werden (Spatari et al. 2015). Innerhalb dieser Analysemethoden gibt es zwei verschiedene Ansätze. Der Top-Down-Ansatz und der Bottom-Up-Ansatz. Beim Top-Down-Ansatz werden hauptsächlich statistische Daten in Kombination mit der Lebenszykluszeit für bestimmte Produkte verwendet, um die Input-Flows gegenüber den Output-Flows zu charakterisieren und den in Verwendung befindlichen Bestand

zu bestimmen. Der Bottom-Up-Ansatz bestimmt die Einheiten für bestimmte Produkte und deren Zusammensetzung. Im Vergleich zum Top-Down-Ansatz ist dies zeitaufwändiger, aber auch detaillierter, da beispielsweise Begehungen durchgeführt oder Baupläne analysiert werden. (Spatari et al. 2015; Graedel 2011; Zhu 2014) Beide Ansätze sollten bei genauer Durchführung zu ähnlichen Ergebnissen führen (Graedel 2011).

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoff-wirtschaft“ (Schiller et al. 2015) wurden sowohl der Bottom-Up-Ansatz als auch der Top-Down-Ansatz angewandt um die Größe, Zusammensetzung und Dynamik das Anthropogenen Rohstofflager in Deutschland zu erfassen. Die Gegenüberstellung der Werte beider Ansätze zeigen deutliche Unterschiede. Der ermittelte Inputfluss für Güter- und Materialgruppen liegt bei 371 Mio. t mit dem Bottom-Up-Ansatz und bei 666 Mio.t mit dem Top-Down-Ansatz. So kann bereits an dem Beispiel verdeutlicht werden, dass es sich bei dem Anthropogenen Lager und dessen Dynamik um ein sehr komplexes System handelt. In der Literatur wird häufig der Top-down-Ansatz angewendet, um den Materialbestand für eine weltweite oder nationale Hochrechnung zu charakterisieren. Ein einheitliches systematisches Vorgehen besteht nicht. Der Botten-Up Ansatz wird hier genutzt, um den Materialbestand in verschiedenen Kategorien einschließlich des Gebäudebestands zu bewerten.

Um die räumliche Verteilung der Materialien in der gebauten Umwelt zu visualisieren ist eine Digitalisierung notwendig. In (Zhu 2014) sind die Vorteile eines Geoinformationssystems (GIS) innerhalb des Urban-Mining-Konzepts aufgezeigt. Die Vorteile bewegen sich auf folgenden drei Ebenen: räumliche Visualisierung, Verwaltung von Daten sowie räumliche Analysen und Modellierungen. Um auf diesen drei Ebenen agieren zu können bedarf es einer entsprechenden Datengrundlage. Der Wohngebäudebestand ist geprägt von Alter, Typ und Region. Es wurde Studien durchgeführt, die auf Basis typischer Konstruktionsmerkmale und der Materialzusammensetzung, Bestandsgebäude definieren wie beispielsweis in (Kohler und Yang 2007; Lichtensteiger und Baccini 2008; Gruhler et al. 2002). In (Mastrucci et al. 2017) und (Kleeman et al. 2016b) wurden die gebäudespezifischen Daten mit einem GIS kombiniert. In letzterem wurde eine Ressourcenkarte für das Stadtgebiet Wien erzeugt.

Die Entwicklung und Konkretisierung der Urban Mining Strategie durch die Erschließung von Ressourcenpotenziale der Materialien im Gebäude wird gehemmt durch Informationsdefizite. Daher ist es entscheidend, ein besseres Verständnis über die stoffliche Zusammensetzung des Gebäudebestandes zu erhalten.

1.2 Arbeitshypothese, Forschungsfrage und Zielsetzung

In Zukunft werden die Nutzung und der Einsatz von Sekundärressourcen im Bauwesen weiter an Bedeutung gewinnen. Die Verwertungstechnologien im Bauwesen ermöglichen eine erhöhte Quote an Sekundärressourcen. Die Herausforderung wird sein, die im Bestand vorhandenen Potenziale zu quantifizieren, analysieren und zu verorten, um eine wirtschaftliche Verwertung zu ermöglichen. Darauf aufbauend ist es entscheidend für die Zukunft Neubauten, möglichst durch eine vorhandene Systematik, die Informationen über potenzielle Sekundärressourcen mitzugeben. Ausgehend von den oben genannten Faktoren werden die folgenden Forschungsschwerpunkte untersucht:

- Können die in der Literatur existierenden Werte die Materialien in Bestandsgebäuden wirklichkeitsnah darstellen?

- Können mit dem Instrument der Ökobilanzierung die Materialmengen sowie die Recyclingpotenziale ausgewiesen werden?

- Wie können die gebäudespezifischen Daten strategisch in einem GIS-System integriert werden?

Ziel der Arbeit ist daher eine strategische Erfassung der Materialien von Wohngebäuden sowie darauf aufbauend eine Potenzialanalyse zur Nutzung als Sekundärressourcen durchzuführen. Dabei wird zwischen dem Vorgehen für Bestandbauten und Neubauten unterschieden. Die Kombination der Gebäudedaten mit dem GIS wird durch die Kartierung an drei ausgewählten Untersuchungsgebieten in Deutschland erzeugt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Schritt werden die Materialien im Gebäude, hier im speziellen Wohngebäude, analysiert. Dabei wird zwischen Bestandsgebäuden und Neubauten unterschieden. Die Bestandsgebäude werden nach Bauepoche und Typologie kategorisiert. In der Literatur existieren Werte, die die Materialkennwerte in Bestandsgebäuden darstellen, werden eigene Berechnungen gegenübergestellt. Die Berechnungen basieren auf real existierenden Gebäuden. Auf Basis von Werkplänen werden die in Bestandsgebäuden verbauten Materialien kalkuliert. Dieses Vorgehen wird bei der Ermittlung von Materialkennwerten für Neubauten beibehalten. Darüber hinaus werden auf Basis der Berechnungen detaillierte Materialkennwerte für Bestandsgebäude und Neubauten ermittelt und eine Datenbank erstellt (s. Kapitel 4).

Die in Bestandsgebäuden potenziell vorhandenen Schadstoffe werden dargestellt. Auf Grundlage der gesetzlichen Entwicklungen werden die Schadstoffe historisch eingeteilt. Im Speziellen werden die Schadstoffe in Wohngebäuden beschrieben (s. Kapitel 5).

Im zweiten Schritt werden die Potenziale dargelegt, die von Materialien ausgehen, die im Gebäude (Neubauten) verbaut sind. Dazu werden die Lebenszyklusabschnitte C und D der Ökobilanz herangezogen. Die darin enthaltenden Informationen über die Verwertungswege und Potenziale der unterschiedlichen Materialien werden analysiert. Dabei muss zwischen der Materialebene und der Gebäudeebene unterschieden werden. Auf Materialebene liegt das Hauptaugenmerk auf Umweltproduktdeklarationen (Environmental Produkt Deklaration (EPD)). Die für die EPDs berücksichtigten Szenarien der Entsorgung werden untersucht. Darauf aufbauend werden die Szenarien auf Gebäudeebene überprüft. Als Indikatoren für die Potenzialanalyse werden das Treibhauspotenzial (THG) und die Primärenergie (PE) herangezogen. Die Primärenergie wird unterteilt in erneuerbare (PERE) und nicht erneuerbare Primärenergie (PENRE) und separat betrachtet (s. Kapitel 6).

Im dritten Schritt werden die Materialkennwerte, Schadstoffe sowie Potenziale mit Hilfe des Geographischen Informationssystems (GIS) anhand von drei Untersuchungsgebieten analysiert und die Ergebnisse dargestellt (s. Kapitel 7).

2 STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Wohngebäudetypologien

Die Erfassung der Bestandbebauung in Deutschland und dessen Einordnung in Gebäudetypologien ist insbesondere im Rahmen der Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen eingesetzt worden. Aus diesem Grund wurde das Institut Wohnen und Umwelt GmbH 1989 (Ebel, W. et al. 1990) und 1993 (Ebel et al. 1995) beauftragt die Energiesparpotenziale für den deutschen Gebäudebestand zu bestimmen und dafür den Gebäudebestand zu Typologisieren. Eine stetige Aktualisierung der Gebäudetypologien erfolgte in dem EU – Projekt TABULA (Loga et al. 2015). Gegenstand des Forschungsvorhabens TABULA und dem Folgeprojekt EPISCOPE war es „[…] auf Basis typologischer Kriterien und vorliegender Häufigkeiten synthetische „Durchschnittsgebäude“ zu generieren, deren Daten im statistischen Sinn repräsentativ für unterschiedliche Gebäudetypen sind. In Verbindung mit den entsprechenden Häufigkeiten können diese synthetischen Gebäude für die rechnerische Abbildung des Energieverbrauchs nationaler, regionaler oder lokaler Gebäudebestände und für die Ermittlung von Energiesparpotenzialen verwendet werden“ (Loga et al. 2015). Die aktuellste Publikation ist aus dem Jahr 2015. Mit dem Zensus 2011 gab es eine neue Datengrundlage durch welchen der deutsche Wohngebäudebestand analysiert wurde und die Typologisierung des Gebäudebestands erweitert werden konnte. Mit dem Folgeprojekt EPISCOPE wurden in 20 europäischen Ländern Wohngebäudetypologien erarbeitet (IWU 2016).

Zusätzlich gab es auf Ebene der Länder Anstrengungen Gebäudetypologien zu erstellen. Beispielhaft ist hier zu nennen „Die Hessische Gebäudetypologie“ (Eicke-Henning 1997), „Gebäudetypologie Bayern“ (Hinz 2006) sowie „Gebäudetypologie Schleswig-Holstein“ (Walberg 2012). Da im Rahmen der Klimaschutzstrategien auf regionaler Ebene der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden eine große Bedeutung zukommt haben Städte spezifische Gebäudetypologien erstellt: z.B. Heidelberg (ebök 1996), Mannheim (ebök/ifeu 1998) sowie 30 Städte und Kreise in NRW (EnergieAgentur.NRW GmbH). Alle städtischen Wohngebäudetypologien sind vergleichbar mit den Einordnungen der „Durchschnittsgebäude“ nach (Loga et al. 2015).

Materialmassen im Gebäude

Die Forschungsserie „Kartierung des anthropogenen Lagers“ (KartAL) hat zum Ziel „das Anthropogene Stofflager als Kapitalstock der Zukunft zu begreifen, systematisch zu analysieren und zu bewirtschaften“ (Schiller et al. 2015). Das erste Projekt „Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft“ analysiert die Größe und Zusammensetzung des Materiallagers sowie dessen Veränderungsdynamik. Berücksichtigt wurden die langlebigen Güter: Bauwerke der technischen Infrastruktur, Bauwerke des Hochbaus (Wohnen und Nichtwohnen), Haustechnik, Kapitalgüter und langlebige Konsumgüter. Dabei wurde sowohl der Top-Down-Ansatz als auch der Bottom-Up-Ansatz für die Analyse eingesetzt. Beim Top-Down-Ansatz werden hauptsächlich statistische Daten in Kombination mit den Lebensdauern für bestimmte Produkte verwendet, um die Input-Ströme gegenüber den Output-Strömen zu charakterisieren und so das anthropogene Lager zu bestimmen. Der Bottom-Up-Ansatz bestimmt die Einheiten für bestimmte Produkte und deren Zusammensetzung. Im Vergleich zum Top-Down-Ansatz ist dies zeitaufwändiger, aber liefert detailliertere Angeben. Beide Ansätze sollten jedoch bei genauer Durchführung zu ähnlichen Ergebnissen führen. Der Vergleich der Ansätze zeigt Abweichungen auf. Der Gesamtinputstrom des Botten-Up-Ansatzes liegt bei 56% des Wertes des Top-Down- Ansatzes. Auch bei den Output-strömen ergeben sich erhebliche Unterschiede bei der Gegenüberstellung. Diese Abweichungen lassen sich unter anderem auf unterschiedliche Betrachtungsgrenzen, unvollständige Informationen sowie nicht erfasste Materialströme zurückführen. Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der großen Unsicherheiten der Botten-Up-Ansatz als unteren Grenzwert die sichere Variante liefert. (Schiller et al. 2015)

Der Bottom-Up-Ansatz ergab für Deutschland, bezogen auf das Jahr 2010, ein Materiallager von ca. 28 Mrd. t. Dominiert wird dieser Wert von den mineralischen Materialien mit ca. 26 Mrd. t. Diese sind im Wesentlichen auf die Massenbaustoffe Beton und Mauersteine zurückzuführen und dementsprechend

dem Bauwesen zuzuordnen. „Die verbleibenden ca. 2 Mrd. t setzen sich zusammen aus ca. 1,2 Mrd. t Metallen, ca. 250 Mio. t Kunststoffen, ca. 350 Mio. t Holz und etwa 200 Mio. t sonstigen, nicht zuordenbaren Materialien“ (Schiller et al. 2015).

Die speziellen Hochrechnungen der Wohngebäude basieren auf statistischen Daten (Wohnstatistiken (Destatis 2010b) und Bautätigkeitsstatistik (Destatis 2010a)) welche mit gebäudespezifischen Materialkennwerten kombiniert werden. Die gebäudespezifischen Materialkennwerte werden auf Grundlage von zwei Methoden ermittelt. Beide Methoden haben gemeinsam, dass Gebäude spezifische Materialwerte bestimmt werden um darauf aufbauend Hochrechnungen durchzuführen. Die erste Methode (Schiller et al. 2010) beruht auf den Berechnungen von (Buchert et al. 1999; Buchert et al. 2004). Die Gebäudetypen beschreiben synthetische Gebäude welche die durchschnittlichen Eigenschaften von Teilbeständen des Gebäudebestandes in Deutschland wiedergeben. Es wird unterschieden in Ein- und Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser. Bei den Materialkennwerten werden die fünf Hauptbaustoffgruppen Mineralische Baustoffe, Holz, Metalle, Kunststoffe und sonstige Baustoffe angegeben. Die Materialkennwerte werden in tonne Baustoff pro Wohneinheit angegeben.

Die Gebäudetypologie nach (Gruhler et al. 2002) verwendet synthetische altersklassenbezogene Typenvertreter. Diese Typenvertreter stellen eine Gebäudeart und Bauepoche sowie dominierende Bauweisen, Baukonstruktion, Bauelemente und Baustoffe dar. Es wurde festgestellt, dass die Stoffintensität (Quotient aus Materialmasse und einer gebäudetypischen Fläche oder einem gebäudetypischen Volumen) je nach Bezugsgröße und Gebäudetyp variiert. Die Stoffintensität für Mehrfamilienhäuser zeigt im Durchschnitt ein Wert von 2,2 t/m² HNF (Hauptnutzfläche) wohingegen Einfamilienhäuser mit durchschnittlich 2,8 t/m² HNF eine 27 % höhere Stoffintensität aufweisen. (Gruhler et al. 2002) Basierend auf den ermittelten Gebäudestoffintensitäten wurden Berechnungen für städtische Teilräume von Freiburg, Zittau und Leipzig durchgeführt. Dabei lag das Hauptaugenmerk darauf Stadtstrukturtypen von Wohnbebauungen zu charakterisieren und zu analysieren. Diese „[…] Analysen auf der Ebene von Stadtstrukturtypen der Wohnbebauung haben gezeigt, dass stofflich-energetische Kennwerte von Gebäudetypen geeignet sind, Wohnungsbestände in ihrem vorhandenen Zustand abzubilden und zu beschreiben“ (Gruhler et al. 2002).

Die Methode nach (Gruhler et al. 2002) erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Eingangsdaten und Bezugsgrößen für die Bestimmung der Materialkennwerte im Bestand und wird für die vorliegende Arbeit angewandt. Die Methode ist in Kapitel 4 näher erläutert.

In (Lichtensteiger 2006) ist eine Bottom-Up-Studie durchgeführt worden, indem statistische Daten kombiniert und Baupläne analysiert wurden, um den Gebäudebestand der Schweiz für das 20. Jahrhundert zu charakterisieren. Die Bestandsaufnahme erfolgte durch Einteilung der Gebäude in vier Bauklassen: Einfamilienhaus (hier SFH), Mehrfamilienhaus, Wirtschaftsgebäude und Produktionsgebäude. Dabei wurden vier gleiche Zeiträume 1900-1925, 1926-1950, 1951-1975, 1976-2000 berücksichtigt. Basierend auf diesen Daten wurde eine 4-mal-4-Matrix erstellt und jeder Kombination aus Gebäudeklasse und Periode ein Modellgebäude zugeordnet. Das Modellgebäude enthält typische Materialwerte, begrenzt auf Kies / Sand, Mergel / Ton, Zement, Holz und Kupfer.

Die Methode nach (Lichtensteiger 2006) erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Eingangsdaten und Bezugsgrößen für die Bestimmung der Materialkennwerte im Bestand und wird für die vorliegende Arbeit angewandt und der Methode nach (Gruhler et al. 2002) zur Validierung gegenübergestellt. Die Methode ist in Kapitel 4 näher erläutert.

Auch international gab es Anstrengungen Studien durchzuführen die mit Hilfe des Botten-Up-Ansatzes Materialien im Gebäudebestand bestimmen. (Hashimoto et al. 2007) quantifizierten den Gebäudebestand in Japan, indem er auf Grundlage statistischer Daten den Gebäudebestand in physischen Größen pro Flächeneinheit mit den Materialintensitätsraten für mehrere Gebäudetypen in Beziehung setzte. Es wird auch eine Prognose des Materialbestandswachstums in Japan bis 2030 erstellt. Folgende Bauminerale wurden untersucht: Asphalt, Sand, Kies und Schotter. Auch in Singapur (Arora et al. 2019),

Norwegen (Bergsdal et al. 2007), Schweden (Gontia et al. 2018), Australien (Stephan und Athanassiadis 2017), Luxemburg (Mastrucci et al. 2017) London (Tudela et al. 2019), Rio de Janeiro (Condeixa et al. 2017) wurden vergleichbare Botten-Up-Ansätze in Bezug auf Wohngebäude durchgeführt.

GIS-basierte Erfassung von Materialbestand

Eine zeitliche und räumliche Einordnung und Bewertung von Materialien im Gebäude und Infrastruktur wurde von (Tanikawa und Hashimoto 2009) für zwei Städte (Japan u. Großbritannien) basierend auf einem 4d-GIS durchgeführt. Eine Analyse für ganz Japan ist in (Tanikawa et al. 2015), ebenfalls für Materialien in Gebäuden und Infrastruktur, dargestellt. (Meinel et al. 2009) entwickelte auf Gemeindeebene eine Methode zur Berechnung von Siedlungsstrukturparametern basierend auf einer räumlichen Analyse durch Kombination von Gebäudedaten aus topographischen Karten 1:25 000, Blockgrenzen aus maßgebenden digitalen Karten und statistischen Daten. Das Verfahren ist als Toolbox in der Geographischen Informationssystem (GIS)-Software ESRI ArcGIS implementiert und soll als bundesweites Monitoring-System der Siedlungs- und Freiraumentwicklung eingesetzt werden. Für ein 2,6 km² großen Fläche von Philadelphia (USA) charakterisierte (Marcellus-Zamora et al. 2016) Gebäude basierend auf Landnutzungstypen mit Hilfe eines GIS-Systems.

Für einen ausgewählten Stadtteil von München wurde in (Heinrich 2019) ein 3D-Stadtmodell genutzt um ein Stoffstrommodell zu entwickeln. Dieses Stoffstrommodell ermittelt den Ist-Zustand der stofflichen Zusammensetzung der Bestandswohngebäude. Eine Gesamtmasse von 2,2 Mio. t wurde für den Münchener Stadtteil Freiham ermittelt. Mit 48% zeigen die Betone den dominierenden Anteil gefolgt von Mauersteinen mit 24 % und Metallen (5%). (Heinrich 2019)

In (Kleeman 2016a; Kleemann et al. 2016) wird mit einem GIS-System die Gebäudestruktur der Stadt Wien analysiert und Materialintensitäten bestimmt. Es ergab sich eine Gesamtmasse von 380 Mio. t für das Stadtgebiet Wien wobei neben den Wohngebäuden zusätzlich Gewerbe und Industriebauten integriert sind. Den dominierenden Teil der Gesamtmasse machen auch hier mit mehr als ca. 96% die mineralischen Materialien aus. (Kleemann et al. 2016)

Alle dargestellten Untersuchungen zeigen die Vorteile der Anwendung eines GIS-Systems bei der Ermittlung ausgewählter Aspekte des Gebäudebestandes auf unterschiedlichen Ebenen wie Städten und Ländern. Es werden andererseits insbesondere die Schwierigkeit betont verschiedene GIS-Datensätze zu kombinieren (z.B. raumspezifische Datensatz und Datensatz über zeitliche Informationen). Ebenfalls kritisch wird der Mangel an Informationen über die wichtigsten Eigenschaften von Gebäuden, wenn es um die Ermittlung des Gebäudebestandes geht wie z.B. Materialienzusammensetzung oder Baujahre, angemerkt. Neubauten wurden, wenn nur in geringen Maßen berücksichtigt. So wurde in dieser Arbeit ein systematischer Ansatz angewandt um die Datenlücken bei Materialermittlungen im Bestand zu verringern sowie insbesondere die vorhandene Systematik der Gebäudeökobilanzierung genutzt um detaillierte Informationen über materialspezifische Aspekte bei Neubauten zu erfassen. Das Potenzial der detaillierten Erfassung der Materialzusammensetzungen für Neubauten soll aufgezeigt werden um die beleuchteten Datenlücken wie diese aktuell bei den Bestandsbauten vorliegen nicht entstehen zu lassen.

3 METHODIK

Die systematische Erfassung der Sekundärressourcen in Wohngebäuden basiert auf mehreren Aspekten. In Abbildung 1 ist die Methodik hierfür dargestellt. Im ersten Schritt werden die Bestandsgebäude typologisiert. Im Rahmen der Projekte (Institut Wohnen und Umwelt 2016; Institut Wohnen und Umwelt: 2012) der Europäischen Union (EU) wurden für 20 europäische Nationen Gebäudetypologien entwickelt, um eine einheitliche energetische Bewertungen von Wohngebäuden durchführen zu können. Das IWU war beauftragt eine Einteilung des deutschen Wohngebäudebestands vorzunehmen. Diese Darstellung der Wohngebäude wird über die Jahre aktualisiert. 2014 wurde die Gebäudetypologie um eine neue Kategorie erweitert. Die „zweite erweiterte Auflage“ (Loga et al. 2015) enthält die aktuelle Version der deutschen Wohngebäudetypologie und wird hier als Grundlager der zu typologisierenden Gebäude und deren energetischen Einordnung herangezogen.

Die folgenden Methoden werden herangezogen, um die Kennwerte der Materialmengen im Bestandsgebäude zu erfassen. Auf Basis der Veröffentlichung (Gruhler et al. 2002) des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR) in sowie der „Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK 04“ (Lichtensteiger 2006) der vdf Hochschulverlag AG werden die Materialintensitäten bestimmt. Den Literaturwerten werden eigenen Berechnungen gegenübergestellt. Dazu wurden auf Basis von Werkplänen Detailberechnungen zu den im Gebäude verbauten Materialien durchgeführt und Materialintensitäten bestimmt. Gebäudeschadstoffe wurden auf Grundlage von Literaturangaben hinsichtlich ihres Aufkommens zeitlich eingeordnet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)“ (Hafner et al. 2017) wurden Gebäudeökobilanzen durchgeführt auf dessen Basis die Materialmengen sowie die Materialintensitäten für Neubauten von Wohngebäuden entstehen. Weiter wurden Aspekte der Gebäudeökobilanz zugrunde gelegt um Recyclingpotenziale der Materialien zu ermitteln. Die dargestellten Aspekte Gebäudetypologie, Materialkennwerte und Gebäudeschadstoffe agieren auf Gebäudeebene und sollen anhand von Untersuchungsgebieten auf Quartiersebene analysiert werden. Was wiederum eine Rückkopplung auf Gebäudeebene gebietsspezifisch ermöglicht. Das verbindende Instrument der Ebenen ist das Geographische Informationssystem.

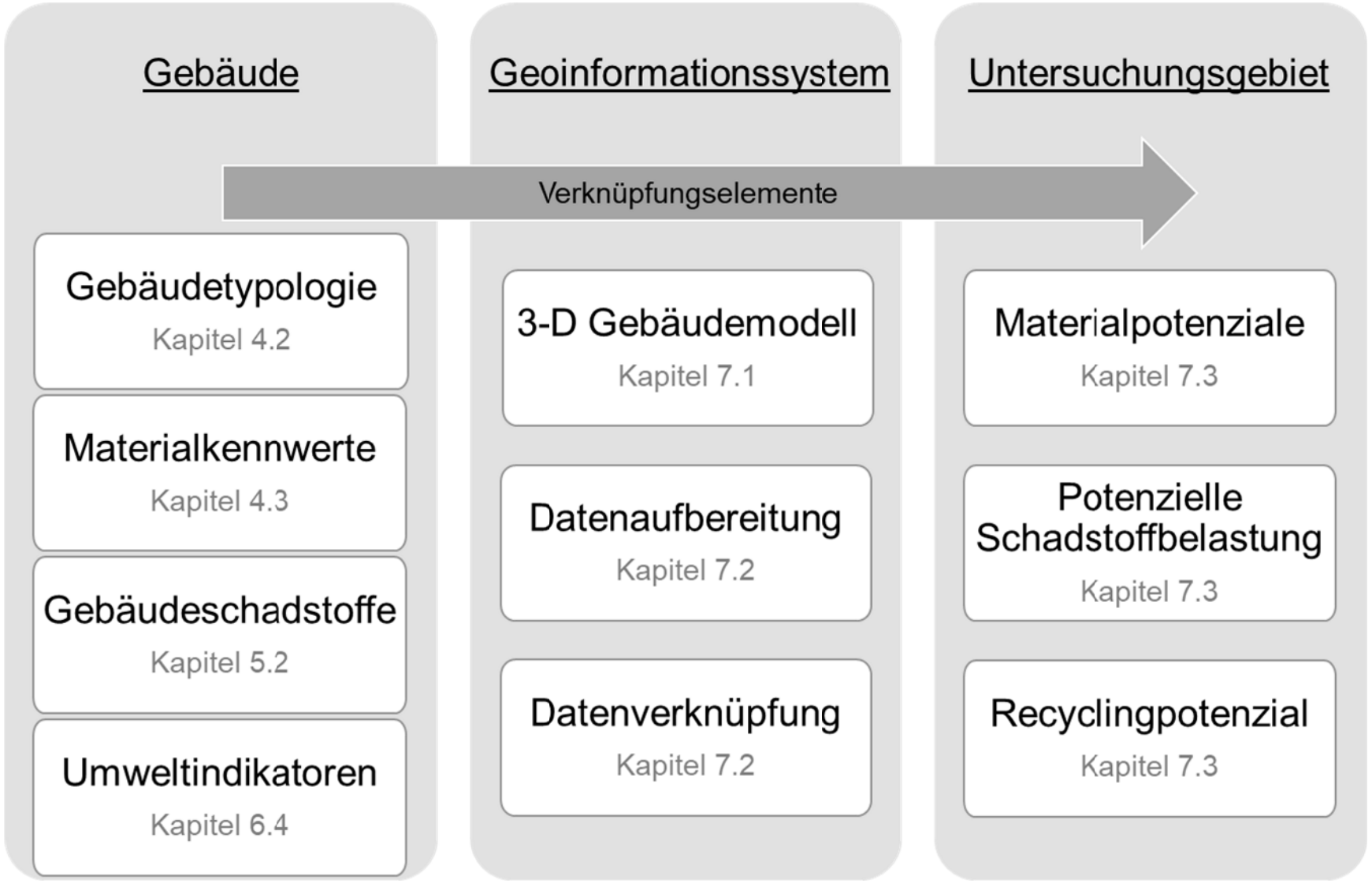


Abbildung 1 Methodik strategische Erfassung der Sekundärressourcen

4 BESTIMMUNG SPEZIFISCHER MATERIALKENNWERTE FÜR UNTERSCHIEDLICHE GEBÄUDEKATEGORIEN

4.1 Allgemeines

Gebäude sind nach (BauO NRW 2018) definiert als „selbstständig benutzbare, überdachte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Mensch, Tieren oder Sachen zu dienen“. In der hier vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Wohngebäude betrachtet. Wohngebäude können nach (Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen 2019) definiert werden als „Gebäude, die mindestens zur Hälfte der Gesamtnutzfläche für Wohnzwecke genutzt werden. Wohngebäude können Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, Doppelhaushälften oder Mehrfamilienhäuser sein, aber auch Gebäude mit Wohnungen, in denen sich Kanzleien, Arztpraxen, Geschäfte o. Ä. befinden“.
Eine im Folgenden wichtige Unterscheidung ist die Einteilung der Gebäude in Bestandsgebäude und Neubauten. Eine einheitliche Definition hierzu gibt es nicht.
In (Lützkendorf 2010) wird der Übergang zwischen einem Neubau und einem Bestandsgebäude über die Inbetriebnahme eines Gebäudes verstanden. „Der Begriff „Bestand“ – hier im Sinne von „Bestandsgebäude“ bzw. „existierendes, in der Nutzung befindliches Gebäude“ kann aus unterschiedlicher Sicht interpretiert werden. Die „[…] Unterscheidung zwischen einem (fertig gestellten und in Betrieb genommenen) Neubau und einem (in der Nutzung befindlichen) Bestandsgebäude […]“ ist fließend. „Da sich im Prinzip ein fertig gestellter Neubau zu einem Bestandsgebäude entwickeln wird“ (Lützkendorf 2010).
Neubau wird nach (Bibliographisches Institut GmbH 2019) definiert als ein „im Bau befindliches Gebäude“, „neu gebautes oder verhältnismäßig neues Gebäude“. Der Begriff verhältnismäßig ist nicht weiter ausgeführt.
Eine exakte Einordnung von Gebäuden in Neubau und Bestand gibt es aus wirtschaftlicher Sicht. In der Wohnungswirtschaft gilt der Stichtag 20.06.1948, der Tag der Einführung der Deutschen Mark, als Grenzwert zwischen einen Neubau und einem Altbau (Sailer et al. 2014). Altbauten werden in dem Zusammenhang zu den Bestandsbauten gezählt.

In dem hier betrachteten Kontext werden Bestandsgebäude von einem Neubau durch die Baujahre abgegrenzt. Die hier betrachteten Literaturwerte für Bestandsbauten weisen Werte bis zu den Jahren 2000 bzw.1990 auf sodass hier unter Neubauten die analysierten Gebäude ab den Baujahren 2001 verstanden werden.

In diesem Kapitel werden die Datengrundlagen vorgestellt, die bei der Ermittlung der Gebäudetypologien und der Gebäudekennwerte angewendet wurden. Die Bestimmungen der Gebäudetypologie, Energie- und Materialkennwerte basieren auf unterschiedlichem methodischem Vorgehen. Es wird aufgezeigt, wie die repräsentativen Werte innerhalb der Methoden ermittelt wurden.
Die erste Methodenbeschreibung bezieht sich auf die Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU). Diese Methode wird zur Bestimmung der Gebäudetypologie gewählt, da diese fortlaufend aktualisiert wurde: die neuste Fassung ist 2015 erschienen und auf nationaler Ebene anwendbar.
Zur Ermittlung der Materialpotenziale werden drei Methoden gewählt, um am Ende einen Vergleich der Werte durchführen zu können. In diesem Zusammenhang wird zuerst die Methode des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR) beschrieben. Die zweite Methode, die unter anderem an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich) entwickelt wurde, stellt die ARK-Haus-Methode (englischen Begriff für Arche) die auf der Zuordnung von Modellgebäuden für bestimmte Baueopochen beruht. Als letzte Methode wird die Berechnung auf Grundlage von Werkplänen erläutert. In dieser Methode werden die Materialien mit Hilfe der Software „Lebenszyklus-Gebäude-Planung“ (LEGEP) kalkuliert. Die detaillierte Bestimmung der Materialkennwerte wird den Literaturwerten gegenübergestellt um eine Sensitivitätsanalyse der in der Literatur vorhandenen Werte durchzuführen.

4.2 Gebäudetypologie

IWU Bestimmung der Gebäudetypologien

Eine der aktuellsten Gebäudetypologien basiert auf der Datengrundlage der Zensus 2011 Erhebung, die unter anderem den deutschen Wohngebäudebestand vollständig erfasste (Loga et al. 2015). Ziel dieser Studie war es „eine Hilfestellung für die energetische Klassifizierung von Bestandsgebäude zu geben und hierfür systematische Ansätze, Kriterien und typische Kennwerte zu liefern“ (Loga et al. 2015).
Der Begriff Gebäudetypologie wird in diesem Kontext als „eine systematische Beschreibung der Kriterien für die Klassifizierung von Gebäuden“ (Loga et al. 2015) verstanden. Auf Grundlage von typologischen Kriterien und Verteilungshäufigkeiten werden synthetische Durchschnittsgebäude generiert, welche repräsentativ für die verschiedenen Gebäudetypen sind. Die durchgeführte Klassifizierung des deutschen Gebäudebestandes erfolgte nach energierelevanten Merkmalen, die sich an Baualtersklassen und an Größenklassen orientiert. In Tabelle 1 sind die im Zensus 2011 vorgegebene Untergliederung und die zugeordnete Gebäudeklasse dargestellt.

Tabelle 1: Bauleittypen mit der dazugehörigen Größeneinteilung nach der IWU (Loga et al. 2015)

Bezeichnung	**Beschreibung**
Einfamilienhaus (EFH)	Freistehende Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen
Reihenhaus (RH)	Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen als Doppelhaus, gereihtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp
Mehrfamilienhaus (MFH)	Wohngebäude mit 3 bis 12 Wohnungen
großes Mehrfamilienhaus (GMH)	Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen

Darauf aufbauend werden über synthetische Durchschnittsgebäude repräsentative Gebäude bestimmt und in einer Haustypenmatrix abgebildet. Diese ist in Abbildung 2 dargestellt (Loga et al. 2015).
Zur Bestimmung der energierelevanten Merkmale erfolgte die Bildung von 11 Baualtersklassen, welche sich an den historischen Entwicklungen, an statistischen Daten und den Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften orientieren. Die energierelevanten Merkmale sind aus der Gebäudegeometrie der Gebäude und aus der Baualtersklasse abgeleitet worden. Dabei wurde die Gebäudeaußenhülle bestimmt, die von den Bauelementen Dach, obere Geschossdecke, Außenwand, Fenster und Fußboden gebildet wird. Deren Konstruktionsweisen und der daraus resultierende Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) wurden bei der Transmissionswärmeverlustberechnung berücksichtigt. (Loga et al. 2015)

Abbildung 2: Haustypenmatrix der Gebäudetypologien der IWU (Loga et al. 2015)

4.3 Methoden der Bestimmung von Materialkennwerte für Bestandsbauten

IÖR Gebäudesteckbriefe

Im Rahmen des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR) sind stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe entwickelt worden, die einen Beitrag zum nachhaltigen Stoffstrommanagement leisten sollen. Die Gebäudesteckbriefe enthalten Informationen und Kennwerte zu stofflich-energetischen Größen wie Stofflager, Stoffintensitäten, Kumuliertem Energieaufwand und Heizenergiebedarf.

Es werden 10 Mehrfamilienhäuser der Baujahre 1880-1990 und 8 Einfamilienhäuser 1960-1990 als Typenvertreter gewählt. Die Ermittlung der stofflichen Kennwerte erfolgte auf einem Excel-gestützten Baustoff-Berechnungs-Programm (Gruhler et al. 2002). Der Vorgang, der in zwei Teilen abläuft, wird in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Im ersten Teil der Berechnung werden Gebäude nach der DIN 276 in folgende Bauteile untergliedert (Gruhler et al. 2002):

- Gründung
- Fundament
- Außenwand: Kellergeschoss
- Außenwand: Erd- und Obergeschoss
- Fenster/Außentür
- Innenwand
- Innentür
- Decke
- Dach

Fundament								
(1) Index	(2)	(3)	(4) Anteil %	(5) Höhe/ Dicke m	(6) Dichte kg/m³	(7) Menge kg/m²	(8) Menge kg	(9)
	Fundament							
	Ziegelmauerwerk		35	0,600				
32	– Vollziegel %	75		0,450	1 800	283,5	14 238,2	
12	– Mörtel %	25		0,150	2 000	105,0	5 273,4	
	Bruchsteinmauerwerk		35	0,600				
39	– Bruchstein %	80		0,480	2 200	369,6	18 562,3	
12	– Mörtel %	20		0,120	2 000	84,0	4 218,7	
21	Beton B5		30	0,600	2 400	432,0	21 696,2	
						1 274,1	Summe	63 988,9
Gesamt								63 988,9

Abbildung 3: Beispielhaftes Grund-Modul für das Bauteil Fundament (Gruhler et al. 2002)

Die Berechnung der Stoff- bzw. Materialmenge erfolgt für jedes Bauteil separat. Dabei werden Grund-Module angelegt, die die stoffliche Zusammensetzung sowie die Dimensionierung eines Bauelementes beschreiben. Im Anschluss werden Flächen der Bauelemente mit ihren Grund-Modulen verknüpft. (Gruhler et al. 2002) Der Aufbau eines Grund-Modules setzt sich aus neun Spalten zusammen, siehe Abbildung 3, wobei die Spalte (1) und (2) die unterschiedlichen Baustoffschichten eines Bauteils beschreiben. In Spalte (3) wird der prozentuale Anteil der Materialmenge im Schichtaufbau angegeben. Spalte (4) beschreibt, wie häufig die Baustoffkombination für das Bauteil vorkommt, bezogen auf die Gesamtheit des betrachteten Gebäudetyps. In Spalte (5) werden die jeweiligen Höhen und Dicken der Schichten eingetragen und in Spalte (6) sind die Dichten kg/m³ der jeweiligen Baustoffe notiert. In den

folgenden Spalten erfolgt die Stoffmengenermittlung. Spalte (7) bezieht sich auf das Gewicht der Stoffmenge in kg/m² Bauteilfläche, dass durch die Multiplikation der Höhe bzw. Dicke mit der Baustoffdichte ermittelt wird. In Spalte (8) werden die absoluten Stoffmengen in kg angegeben, die sich aus der Multiplikation der Spalte (7) mit der tatsächlichen Bauteilfläche ergeben. Die Spalte (9) fasst alle absoluten Stoffmengen zu einem absoluten Wert für das Grund-Modul zusammen. In Abbildung 3 ist ein beispielhaftes Grund-Modul für das Bauteil Fundament aufgezeigt, das eine mögliche Zusammensetzung wiedergibt. (Gruhler et al. 2002) Im zweiten Teil der Kennwertermittlung werden die einzelnen Stoffmengen in Baustoffgruppen zusammengefasst, die in den jeweiligen Bauteilen berechnet wurden:

- Putz, Estrich, Mörtel
- Betone
- Mauersteine
- Bauplatten
- Holz, Holzwerkstoffe
- Wärmedämmstoffe
- Dachdeckungen
- Beläge, Dichtungsbahnen
- Sonstige Stoffe/Schüttung
- Metalle

Auf dieser Grundlage sind repräsentative Baustoffkennwerte ermittelt worden, die den genauen Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung eines jeden Bauteils beinhalten (Gruhler et al. 2002).

Ergänzend zu den stofflichen Kennwerten werden in (Gruhler et al. 2002) auch die umweltrelevanten Indikatoren kumulierter Energieaufwand, Versauerungspotenzial und Treibhauspotenzial betrachtet. Als Datengrundlage der umweltrelevanten Indikatoren wurde hier das „Gesamt-Emissions-Modell-integrierter Systeme“ (GEMIS) herangezogen.
In Deutschland steht die speziell für den Baubereich entwickelte Ökobaudat als Grundlage für die Bestimmung von umweltrelevanten Indikatoren zu Verfügung (s. Kapitel 6). Aus diesem Grund wird hier auf den Aspekt der umweltrelevanten Indikatoren aus (Gruhler et al. 2002) nicht weiter eingegangen.

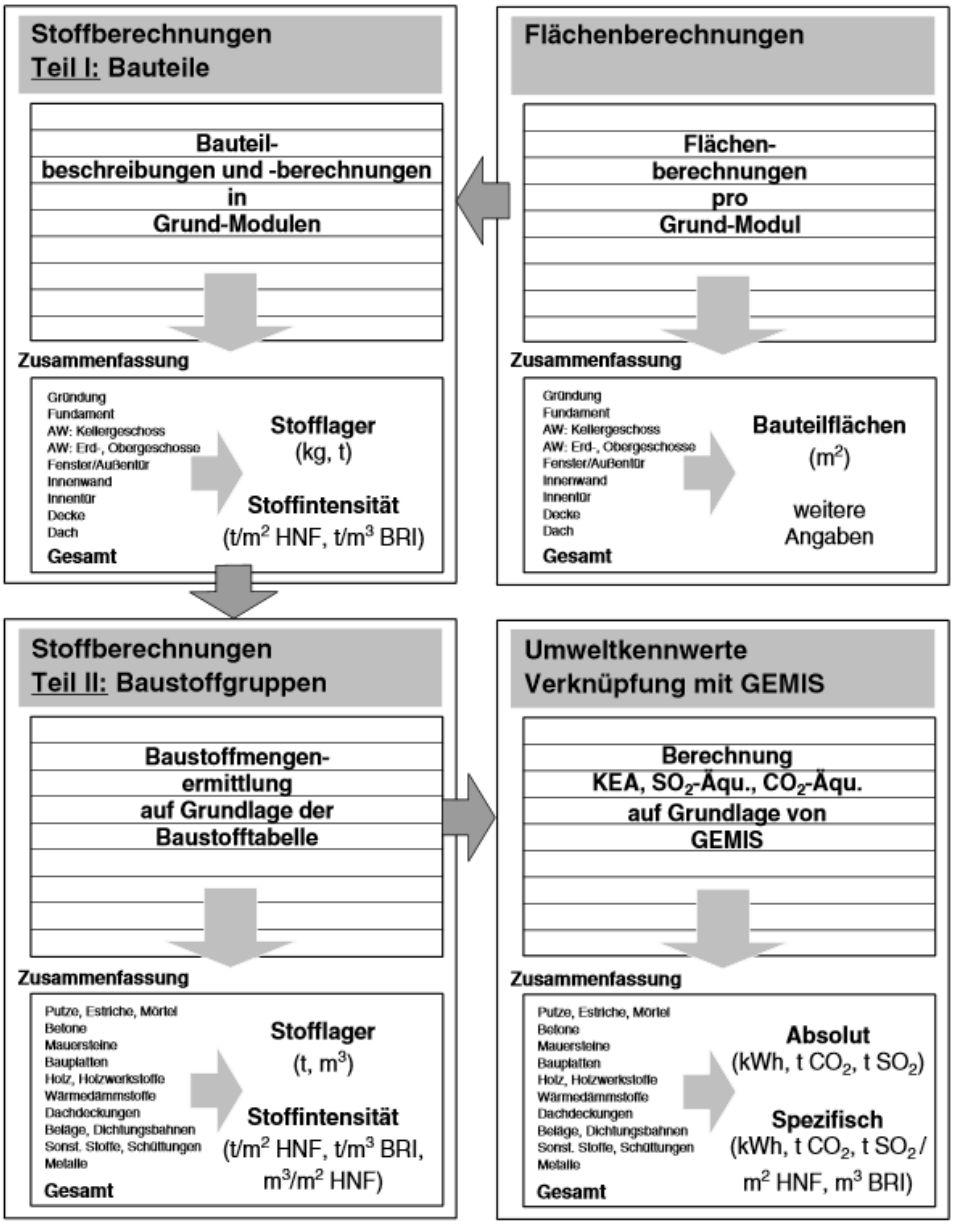


Abbildung 4: Darstellung des systematischen Vorgehens bei der Ermittlung der Baustoffmengen und Emissionen (Gruhler et al. 2002)

ARK-Haus

Die Arbeit (Lichtensteiger 2006) ist im Zuge des Forschungsprojektes „ARK 04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften“ an der ETH Zürich und der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) unter der Leitung von Prof. Dr. Peter Baccini entstanden. Das Projektziel war das Erstellen von dynamischen Ressourcenmodellen. Diese „sollen dazu dienen, die physiologischen und ökonomischen Veränderungen einer konkreten Region, in Abhängigkeit unterschiedlicher Entwicklungsszenarien für das Bauwerk, in einem urbanen System besser verstehen zu können“ (Lichtensteiger 2006).
Auf nationaler Ebene der Schweiz ist der Gebäudebestand betrachtet und der Materialgehalt abgeleitet worden. In der Betrachtung haben folgende Baustoffe Priorität:

- Kies/Sand
- Mergel/Ton
- Zement
- Holz

Das schematische Vorgehen der Materialgehaltsrechnung nach (Lichtensteiger 2006) ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Ermittlung der Kennwerte basiert auf Grundlage der Bauvolumenentwicklung im 20. Jahrhundert in der Schweiz. Durch die zeitlichen Entwicklungen der Brutto-Geschossflächen und der Geschosshöhen war es möglich, das genaue Bauvolumen zu erfassen, bzw. die Gebäudeanzahl mit definiertem Volumen zu bestimmen. In der Methode sind die Gebäudebestände nach den Gebäudenutzungstypen und den Bauepochen beschrieben. Dabei wird unter folgenden Gebäudenutzungstypen differenziert:

- Einfamilienhaus (EFH)
- Mehrfamilienhaus (MFH)
- Dienstleistungsgebäude (DLG)
- Produktionsgebäude (PRG)

Mit den ermittelten Daten des Bauvolums ist es möglich das Raumprogramm zu definieren, welches das quantitative Verhältnis des Konstruktionsvolumens V_K [m³] zum Gesamtvolumen V_G [m³] darstellt. Demnach entsprechen die Volumina der Bauelemente (BE): Dach, Horizontal (tragend), Horizontal (nicht tragend), Vertikal (tragend), Vertikal (nicht tragend), Fundament und der Haustechnik dem V_K [m³]. Das Bausystem beschreibt die Konstruktionsweise mit den dazugehörigen Baumaterialien. Diese sind auf Basis von empirischen Daten und durch Literatur zur Baubranche in der ARK-Methode bestimmt worden. Die Materialgehaltsbestimmung erfolgte durch die Zuteilung von einer Baumaterialmenge (z. B. Betongehalt) zu jedem Bauelement. Die Mengen sind in der flächenspezifischen Dimension in kg pro m² angegeben. Durch die Multiplikation des Materialgehalts mit der Bauelementfläche wurden die spezifischen Baumaterialien bzw. die Materialgehalte berechnet. Nach der Durchführung der Multiplikation für jedes BE, sind die spezifischen Werte aufsummiert worden, um die Gesamtmasse des Gebäudes festzustellen. (Lichtensteiger 2006)

Bauelement (BE)	**Bausystem**	**Baumaterialgehalte**	**Materialgehalte**
	Variation		
Abhängigkeit vom Raumprogramm -> Dimensionen der Bauelemente [m^2 BE]; [kg/m^2 BE]	Wirkung auf Konstruktions-volumen V_K [kg/m^3 V_K]	Baumaterial- und konstruktionsspezifische Grössen [kg/m^2 BE]	Materialspezifische Grössen [kg/m^2 BE]
Häufigkeit unterschiedlicher Raumprogramme	Häufigkeit unterschiedlicher Bausysteme	Häufigkeit von Konstruktionsweisen	Häufigkeit der Ausführung in einem bestimmten Material

Abbildung 5: Systematische Vorgehensweise bei der Ermittlung der Materialgehalte in der ARK-Methode (Lichtensteiger 2006)

Die Bauvolumenentwicklung ist über die nutzungsspezifischen Flächenbedürfnisse und über die Raumhöhe abgeleitet worden. Flächen, die dem Haus angehören, jedoch nicht dem Nutzen des Wohnens dienen, wie z. B. Keller, Lift, Treppenhaus, Garage, etc., werden in der ARK-Methode nicht betrachtet. Die Modellgebäude stellen die durchschnittlichen stofflichen Zusammensetzungen der Gebäude dar. Der Betrachtungszeitraum (Systemgrenze) bezieht sich auf das 20. Jahrhundert und ist in vier gleichlange Bauepochen von je 25 Jahren unterteilt. In Abbildung 6 wird ein Überblick der Einteilung zu den Modellgebäuden gegeben. (Lichtensteiger 2006)

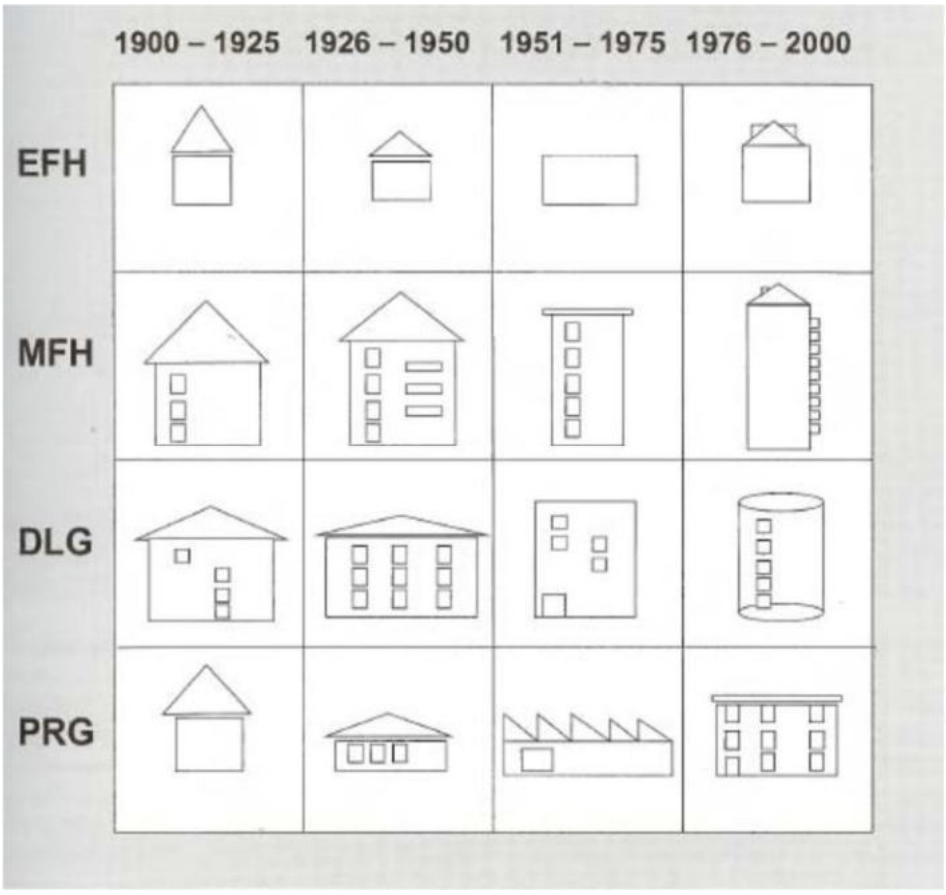


Abbildung 6: Matrix der Modellgebäude der ARK-Methode nach Epoche und Gebäudenutzungstyp (Lichtensteiger 2006)

Die Materialzusammensetzungen sowie der Bruttorauminhalt der Modellgebäude sind unverändert übernommen worden. Im weiteren Verlauf werden nur die Gebäudenutzungstypen EFH und MFH betrachtet.

Materialkennwerte auf Basis von Werkplänen

Um eine Sensitivitätsanalyse der Literaturwerte durführen zu können wird für ausgewählte Gebäude eine Massenermittlung durchgeführt. Dazu werden auf Basis von real existierender Gebäude und den dazugehörigen Werkplänen die im Gebäude verbauten Materialmengen berechnet. Eine Problematik, die sich bei der Berechnung von Materialmengen über Werkpläne ergibt, ist die Qualität der Unterlagen. Alte Werkpläne können z.B. unvollständig sein oder beinhalten keine Detailinformationen über Anschlüsse. Um diese Informationslücke zu schließen werden die Berechnungen mit dem Programm LEGEP durchgeführt.

LEGEP (Lebenszyklus-Gebäude-Planung) ist in Kombination mit den sirAdos-Baudaten eine Software, die es ermöglicht Herstellungs- und Lebenszykluskosten, den Energiebedarf sowie die ökologischen Auswirkungen von Gebäuden zu berechnen. Dabei setzt sich das Programm aus unterschiedlichen Modulen zusammen (König 2015a).
Bevor die Module angewendet werden können, wird eine Datenbank erstellt. Diese bildet die Datengrundlage und wird von jedem Modul zur Berechnung herangezogen. Die Datenbank beinhaltet die mengenmäßige Erfassung von Bauteilen nach der DIN 276 zur Kostenplanung von Gebäuden sowie der DIN 18960 zur Erfassung der Kosten in der Nutzungsphase. Außerdem erfolgt eine dreistufige Gliederung in Makroelemente, Grobelemente und Feinelemente. Der strukturelle Aufbau der LEGEP Datenbank ist in Abbildung 7 dargestellt (König 2013).

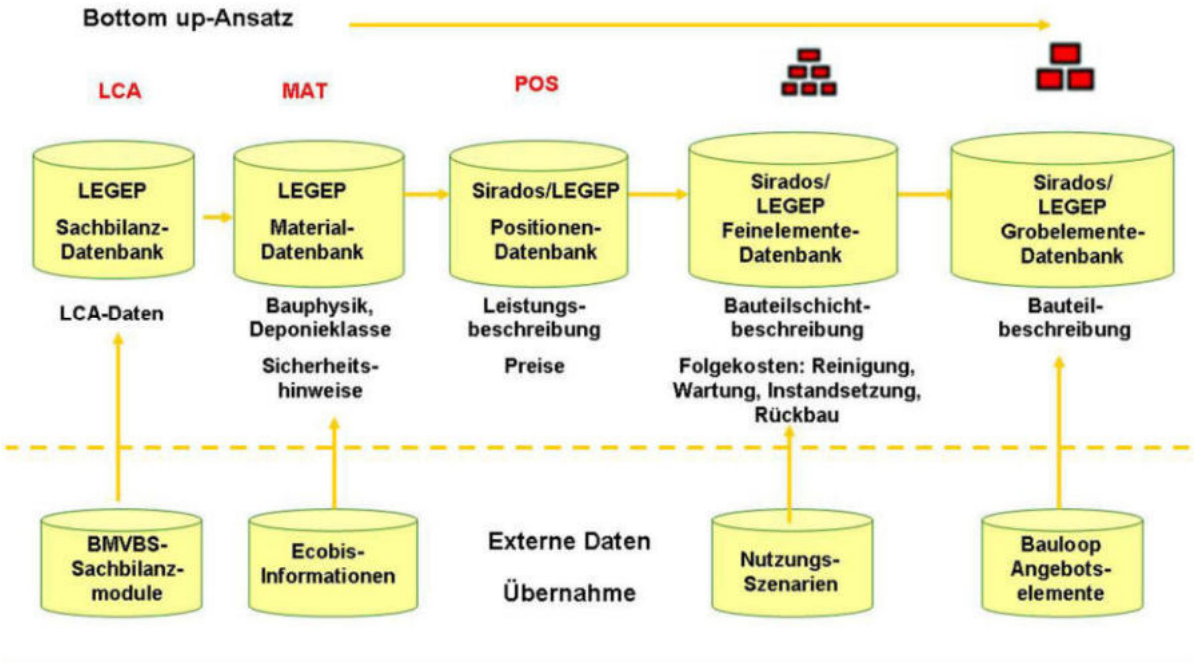


Abbildung 7: Struktureller Aufbau der LEGEP Datenbank (König 2009)

Das Programm-Modul „Kostenplanung“ berechnet die Erstellungskosten eines Gebäudes unter Verwendung der sirAdos-Elementtypen. Dabei werden die Kosten im Rahmen der Anforderungen nach der DIN 276 (2008) unter Berücksichtigung der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) berechnet. Unter dem Programm-Modul „Wärme und Energie“ werden Energieausweise für Gebäude angefertigt. Die Berechnungen erfolgen nach der geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) unter Berücksichtigung der Rechenverfahren nach der DIN V 4108-6/DIN V 4701-10 für Wohngebäude und der DIN V 18599 für Nichtwohngebäude. Die Bewertung von unterschiedlichen Baumaßnahmen an Bestandsgebäuden für Wohn- und Nichtwohngebäude, erfolgt unter dem Programm-Modul „Wirtschaftlichkeit“. Das Modul „Lebenszykluskosten“ erstellt eine Kostenplanung für alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes und beinhaltet die Herstellungs- und Nutzungskosten nach der DIN 276, DIN 18960 und dem Final Report EU-TG4 LCC in Construction, der in die Phasen Reinigung, Wartung, Instandsetzung und Rückbau untergliedert ist. (König 2015b)

In dem Modul „Ökologie“ werden Ökobilanzen für alle Lebenszyklussituation erstellt, die Berechnungen erfolgen nach der DIN EN 15804 und der DIN EN 15978 (König und Mandl 2012; König 2013). Dabei bilden die Daten der ÖKOBAU.DAT die Datenbasis. Die ÖKOBAU.DAT wird von dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) öffentlich zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet die ökologischen Wirkungen von Baumaterialien sowie die Bau- und Transportprozesse (BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung). In LEGEP ist es weiter möglich überschlägige Lebenszykluskosten zu berechnen, Bauprodukte zu erfassen, Risikostoffe zu berechnen und zu beurteilen sowie Vergleiche zwischen Bauelementen durchzuführen (BBSR 2016).

4.3.1 Spezifische Materialkennwerte Bestandsgebäude

Ein Auszug der in (Gruhler et al. 2002) ermittelten Materialkennwerte ist in Tabelle 2 abgebildet. Dargestellt sind 10 Mehrfamilienhäuser und 8 Einfamilienhäuser sowie die dazugehörigen Baujahre, Konstruktionsweise, Gebäudegröße, Gewicht und Stoffintensität. Als Stoffintensität wird der Quotient aus Materialmenge und Gebäudefläche oder Volumen bezeichnet.

Die Gebäude haben 1-11 Etagen. Die Baujahre reichen von vor 1918 bis nach 1990. Die Bruttogeschossfläche (BGF) der MFH variiert zwischen 720 m² und 12867 m³. Daraus ergibt sich eine Spannweite für den Bruttorauminhalt (BRI) von 2002 m³ bis 35888 m³. Die Gewichte der MFH liegen zwischen 860 t bei dem Fachwerkgebäude aus dem Baujahr vor 1918, und einem Plattenbau aus einem Baujahr nach 1970 mit 35888 t. EFH zeigen ein geringeres Gewicht aufgrund der geringen Größe. Mit 221 t ist das Reihenhaus mit dem Errichtungszeitraum nach 1990 das Gebäude mit dem geringsten Gewicht. Die BGF variiert zwischen 197 m² und 302 m² und der BRI zwischen 563 m³ und 729 m³. Die EFH weisen alle als Konstruktionsweise Mauerwerk auf. Bei den MFH variiert die Bauweise, von Fachwerk

über Ziegelbau und Plattenbauweise. Mehrfamilienhäuser haben eine flächenbezogene durchschnittliche Stoffintensität von 1,20 t/m² BGF. Einfamilienhäuser zeigen eine höhere durchschnittliche Stoffintensität von 1,23 t/m² BGF. Wird die Stoffintensität volumenbezogen betrachtet gleichen sich die Durchschnittswerte auf ca. 0,43 t/m³ BRI sowohl für MFH als auch für EFH an. (Gruhler et al. 2002)

Tabelle 2: Materialkennwerte nach (Gruhler et al. 2002)

Bezeichnung Typenvertreter	**Gebäudetyp**	**Baujahr**	**Konstruktionsweise**	**Geschosszahl**	**Brutto-Grundfläche (BGF) [m²]**	**Brutto-Rauminhalt (BRI) [m³]**	**Gewicht [t]**	**Stoffintensität [t/m² BGF]**	**Stoffintensität [t/m³ BRI]**
IMF 1	Mehrfamilienhaus	vor 1918	Fachwerk	KG+4	782	2320	860	1,10	0,37
IMZ 2	Mehrfamilienhaus	1870-1918	Ziegelbau	KG+3	904	2764	1127	1,25	0,41
IMZ 3	Mehrfamilienhaus	1870-1918	Ziegelbau	KG+4	1070	3070	1322	1,24	0,43
IMZ 4	Mehrfamilienhaus	1919-1945	Ziegelbau	KG+4	977	2785	1205	1,23	0,43
IMZ 5	Mehrfamilienhaus	nach 1945	Ziegelbau	KG+4	1042	2810	1178	1,13	0,42
IMI 1	Mehrfamilienhaus	1961-1970	Blockbau	KG+4	720	2002	970	1,35	0,48
IMI 2	Mehrfamilienhaus	nach 1970	Plattenbau	KG+5	891	2672	1130	1,27	0,42
IMI 3	Mehrfamilienhaus	nach 1970	Plattenbau	KG+11	3531	10240	4079	1,16	0,40
IMI 4	Mehrfamilienhaus	nach 1970	Plattenbau	EG+17	12867	35888	14658	1,14	0,41
GWB	Mehrfamilienhaus	nach 1990	Ziegelbau	KG+3	910	2429	1078	1,18	0,44
E-EH 1	Einfamilienhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+1	211	612	301	1,43	0,49
E-EH 2	Einfamilienhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+1	216	729	320	1,48	0,44
E-EH 3	Einfamilienhaus	nach 1990	Mauerwerk	KG+1	302	712	277	0,92	0,39
E-DH 1	Doppelhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+1	218	615	273	1,25	0,44
E-DH 2	Doppelhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+1	227	633	287	1,26	0,45
E-RH 1	Reihenhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+2	249	658	268	1,08	0,41
E-RH 2	Reihenhaus	nach 1960	Mauerwerk	KG+2	197	563	260	1,32	0,46
E-RH 3	Reihenhaus	nach 1990	Mauerwerk	KG+2	207	613	221	1,07	0,36

Tabelle 3 Materialkennwerte nach (Lichtensteiger 2006)

Bezeichnung Typenvertreter	Gebäudetyp	Baujahr	Konstruktionsweise*	Charakteristisches Gebäudevolumen [m³]	Gewicht [t]	Stoffintensität [t/m³ Gebäudevolumen]
MFH_I	Mehrfamilienhaus	1900-1925	Formstein/Holz	1800	686	0,39
MFH_II	Mehrfamilienhaus	1926-1950	Formstein/Beton	2000	740	0,37
MFH_III	Mehrfamilienhaus	1951-1975	Beton/Formstein	2400	840	0,36
MFH_IV	Mehrfamilienhaus	1976-2000	Beton/Metall	2900	1169	0,40
EFH_I	Einfamilienhaus	1900-1925	Formstein/Holz	630	302	0,48
EFH_II	Einfamilienhaus	1926-1950	Formstein/Beton	630	303	0,48
EFH_III	Einfamilienhaus	1951-1975	Beton/Formstein	690	306	0,44
EFH_IV	Einfamilienhaus	1976-2000	Beton/Metall	800	338	0,43

*Formstein ≙ Mauerziegel, Sandstein, Holz ≙ Holzständerkonstruktion

Tabelle 4 Materialkennwerte auf Basis von Werkplänen (eigene Berechnungen)

Bezeichnung Typenvertreter	Gebäudetyp	Baujahr	Konstruktionsweise	Geschosszahl	Brutto-Grundfläche (BGF) [m²]	Brutto-Rauminhalt (BRI) [m³]	Gewicht [t]	Stoffintensität [t/m² BGF]	Stoffintensität [t/m³ BRI]
MFH_1918	Mehrfamilienhaus	1918	Ziegelbau	EG+4OG	3073	6517	2780	0,90	0,43
MFH_1965	Mehrfamilienhaus	1965	Stahlbeton	EG+8OG	2695	7276	3454	1,28	0,47
MFH_1966	Mehrfamilienhaus	1966	Stahlbeton	EG+5OG	2259	6099	3082	1,36	0,51
MFH_1967	Mehrfamilienhaus	1967	Stahlbeton	EG+3OG	1112	3002	1518	1,37	0,51
MFH_1994	Mehrfamilienhaus	1994	Kalksandstein	EG+2OG	1445	3024	1485	1,03	0,49
EFH_1954	Einfamilienhaus	1954	Ziegelbau	EG+1OG	230	528	275	1,19	0,52
EFH_1967	Einfamilienhaus	1967	Kalksandstein	EG+1OG	345	482	309	0,89	0,64
RH_1973	Reihenhaus	1973	Mauerwerk	EG+1OG	293	692	330	1,13	0,48
EFH_1979	Einfamilienhaus	1979	Mauerwerk	EG+1OG	419	1090	378	0,90	0,35
DH_1980	Doppelhaus	1980	Kalksandstein	EG+1OG	771	1773	795	1,03	0,45
EFH_1999	Einfamilienhaus	1999	Mauerwerk	EG+1OG	559	1285	701	1,25	0,55

In Tabelle 3 sind Konstruktionsweisen, Gebäudevolumen, Gewicht sowie die resultierende Stoffintensität für die Gebäude nach (Lichtensteiger 2006) dargestellt. Die Konstruktionsweisen sind für EFH und MFH je Baujahr identisch gewählt. Die Gebäude haben ein charakteristisches Gebäudevolumen zwischen 630 m³ und 2900 m³. Die Baujahre liegen zwischen 1900 und 2000 geplant. Gewicht und Gebäudevolumen nehmen für MFH sowie auch für EFH mit steigendem Baujahr zu. In diesem Fall lässt sich das auf die angenommene Konstruktionsweise zurückführen. Die MFH und EFH aus der Bauepoche 1900-1925 werden mit Mauerwerk- bzw. Holzständerkonstruktionen berechnet welches der Leichtbauweise zuzuordnen ist. Im Vergleich dazu wird für die Gebäude der Baujahre 1976-2000 eine Massivbauweise aus Stahlbeton angesetzt.

Die Berechnung der Stoffintensität erfolgt über das charakteristische Gesamtvolumen der Gebäude. Das charakteristische Gesamtvolumen entspricht der Definition des BRI. Angaben über BGF sind nicht vorhanden. Die mittlere Stoffintensität für MFH liegt bei 0,38 t/m³ und für EFH bei 0,45 t/m³. Die Gegenüberstellung der mittleren Stoffintensität nach (Gruhler et al. 2002) zeigt eine Abweichung von ca. 0,05 t/m² bei den MFH und 0,02 t/m³ bei den EFH.

Als dritte Methode der Ermittlung von Materialkennwerten in Bestandsgebäuden werden die Ergebnisse der Massenermittlungen auf Basis von Konstruktionsplänen real existierender Gebäude dargestellt. In Tabelle 4 sind die Werte für 5 Mehrfamilienhäuser und 6 Einfamilienhäuser dargestellt. Die bilanzierten Gebäude haben 1-9 Etagen sowie zusätzlich ein Kellergeschoss mit einer BGF zwischen 230 m² und 3072 m². Die Gebäude wurden zwischen 1918 und 1999 geplant bzw. gebaut. Alle Gebäude weisen eine massive Bauweise auf. Das Gewicht der EFH liegt bei max. 1773 t, das der MFH bei max. 7276 t. Die flächenbezogene Stoffintensität liegt im Mittel bei 1,19 t/m² für MFH und 1,07 t/m² bei EFH. Die volumenbezogene Stoffintensität der EFH liegt bei durchschnittlich 0,49 t/m³ BRI und bei 0,48 t/m³ BRI für MFH.

4.3.2 Vergleich der Stoffintensität

Ein Vergleich der Stoffintensitäten der MFH ist in Abbildung 8 dargestellt. Als erstes konnte festgestellt werden, dass der Wert der Stoffintensität je nach Gebäudegröße und Gebäudetyp variierte (Gruhler et al. 2002).
Die MFH nach (Gruhler et al. 2002) zeigen eine durchschnittliche Stoffintensität von 0,42 t/m³ BRI. Geringer ist die durchschnittliche Stoffintensität bei (Lichtensteiger 2006) mit 0,38 t/m³ BRI. Mit 0,48 t/m³ BRI zeigen die Gebäude der eigenen Massenermittlung die höchste durchschnittliche Stoffintensität für MFH. Auch der Vergleich der EFH (s. Abbildung 9) zeigt mit 0,49 t/m³ BRI die höchste durchschnittliche Stoffintensität bei der Massenermittlung mit Hilfe von LEGEP. Nach (Gruhler et al. 2002) liegt die Stoffintensität für EFH bei 0,43 t/m³ BRI. Mit 0,46 t/m³ BRI ist die Stoffintensität nach (Lichtensteiger 2006) um 0,03 t/m³ BRI höher als bei (Gruhler et al. 2002).

Das durchschnittlich berechnete Gewicht für MFH ist bei (Gruhler et al. 2002) mit 2760 t und den Massenermittlungen mit LEGEP mit 2464 t nur geringfügig abweichend. (Lichtensteiger 2006) zeigt im Mittel die leichtesten Gebäude mit 858 t.

Ein direkter Einzelvergleich aller Gebäude ist nur bedingt möglich, da Abweichungen der Baujahre oder der Konstruktionsweisen vorhanden sind. Für die Gebäude „IMI 1“ nach (Gruhler et al. 2002) sowie das Gebäude „MFH_1965“ soll jedoch ein Vergleich gezogen werden. Beide Gebäude stammen aus den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts und haben eine tragende Konstruktion aus Stahlbeton. Das Gebäude „IMI 1“ ist hat vier Vollgeschosse, eine BGF von 720 m², einen BRI von 2002 m³ und ein Gewicht von 970 t. Mit neun Vollgeschossen, einer BGF von 2695 m², einem BRI von 7276 m³ und einem Gesamtgewicht von 3454 ist das Gebäude „MFH_1965“ ein größeres Bauwerk. Die flächenbezogene Stoffintensität liegt bei dem Gebäude „IMI 1“ bei 1,35 t/m² BGF, bei dem Gebäude „MFH_1965“ ist diese mit 1,28 t/m² BGF um 0,07 t/m² BGF (5 %) geringer. Mit 0,48 t/m³ BRI des Gebäudes „IMI 1“ und 0,47 t/m³ BRI des Gebäudes „MFH_1965“ ergibt sich eine Abweichung von 0,01 t/m³ BRI (2%) für die volumenbezogene Stoffintensität.
Bei den EFH zeigen die Gebäude „E-RH 1“ und „RH_1973“ hinsichtlich des Baujahres (nach 1960), der tragenden Konstruktion (Mauerwerk) und der Geschossanzahl (EG+1 OG) vergleichbare Eigenschaften. Das Gewicht beträgt 268 t („E-RH 1“) bzw. 330 t („RH_1973“). Die BGF beträgt bei Gebäude „E-RH 1“ 249 m² und bei Gebäude „RH_1973“ 293 m². Der BRI liegt bei 658 m³ („E-RH 1“) und 692 m³ („RH_1973“). Die flächenbezogene Stoffintensität liegt bei dem Gebäude „E-RH 1“ bei 1,08 t/m² BGF, bei dem Gebäude „RH_1973“ ist diese mit 1,13 t/m² BGF um 0,05 t/m² BGF (4 %) höher. Mit

0,41 t/m³ BRI des Gebäudes „E-RH 1“ und 0,48 t/m³ BRI des Gebäudes „RH_1973“ ergibt sich eine Abweichung von 0,07 t/m³ BRI (14%) der volumenbezogenen Stoffintensität.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle drei Methoden vergleichbare Werte für die Stoffintensitäten von Gebäuden liefen. Zu berücksichtigen ist, dass (Lichtensteiger 2006) sich auf den Gebäudebestand der Schweiz bezieht und je vier Typenvertreter bei vier Baujahresbereichen aufweist, aber auch Stoffintensitäten in vergleichbarer Höhe zu den sich auf Deutschland beziehenden Quellen liefert. Die Ermittlung der Stoffintensitäten auf Basis von Werkplänen vorhandener Gebäude und dem Programm LEGEP stellt eine Möglichkeit dar, fehlende Informationen, wie z.B. Bauteilanschlüsse, zu erfassen. Das Vorgehen der Massenermittlung auf Basis von Werkplänen stellt in diesem Fall die aufwendigste Methode dar. Der Vergleich insbesondere zwischen (Gruhler et al. 2002) und den durchgeführten Massenermittlungen mit LEGEP zeigt keine signifikante Abweichung der Stoffintensitäten. Aus diesen Gründen werden als Datenbasis für die Ermittlung der Materialkennwerte in den Untersuchungsgebieten die beschriebenen Literaturwerte nach (Gruhler et al. 2002) herangezogen und den Werten nach (Lichtensteiger 2006) gegenübergestellt.

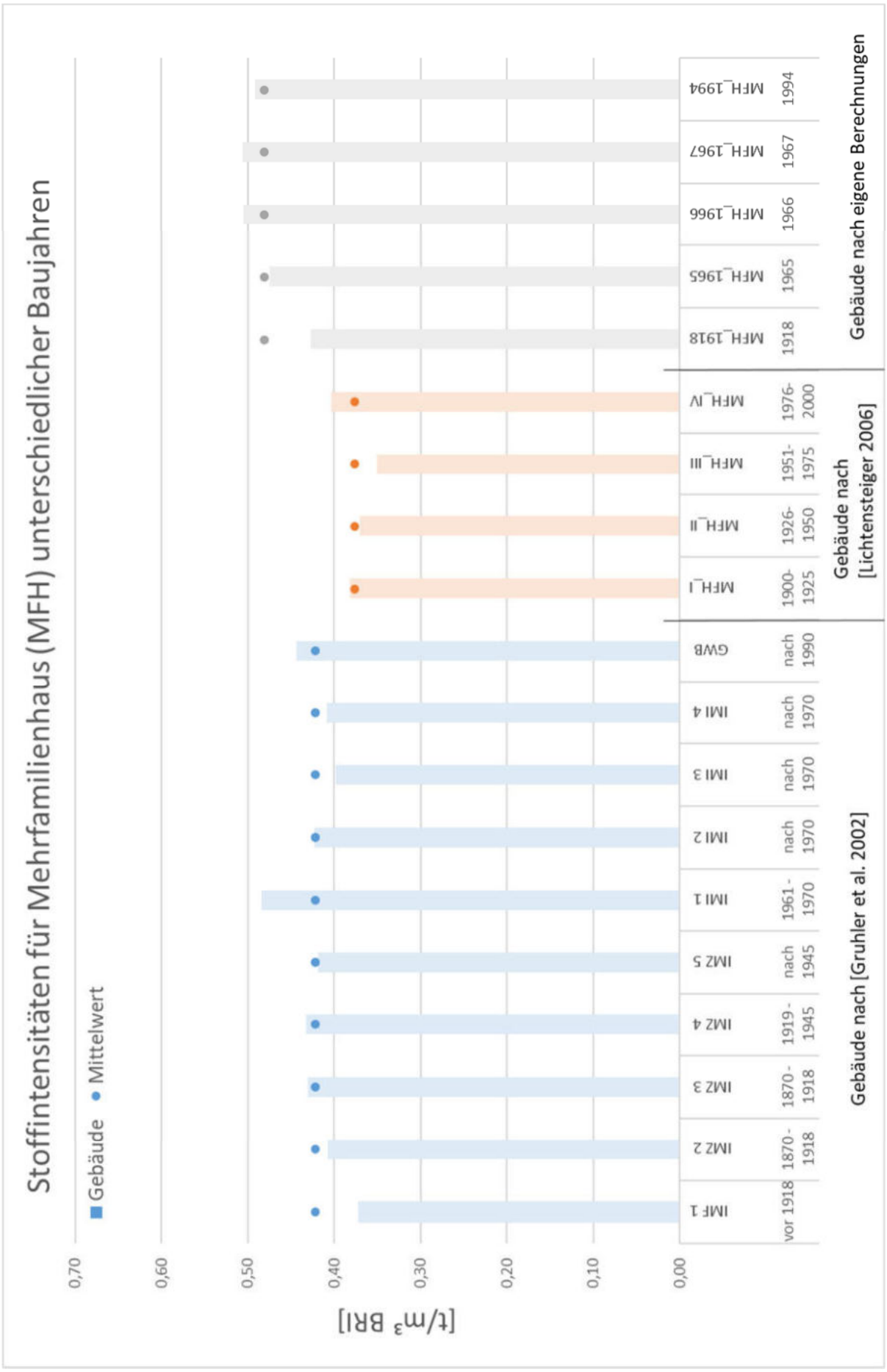


Abbildung 8 Vergleich der Stoffintensitäten für MFH, Bestandsgebäude

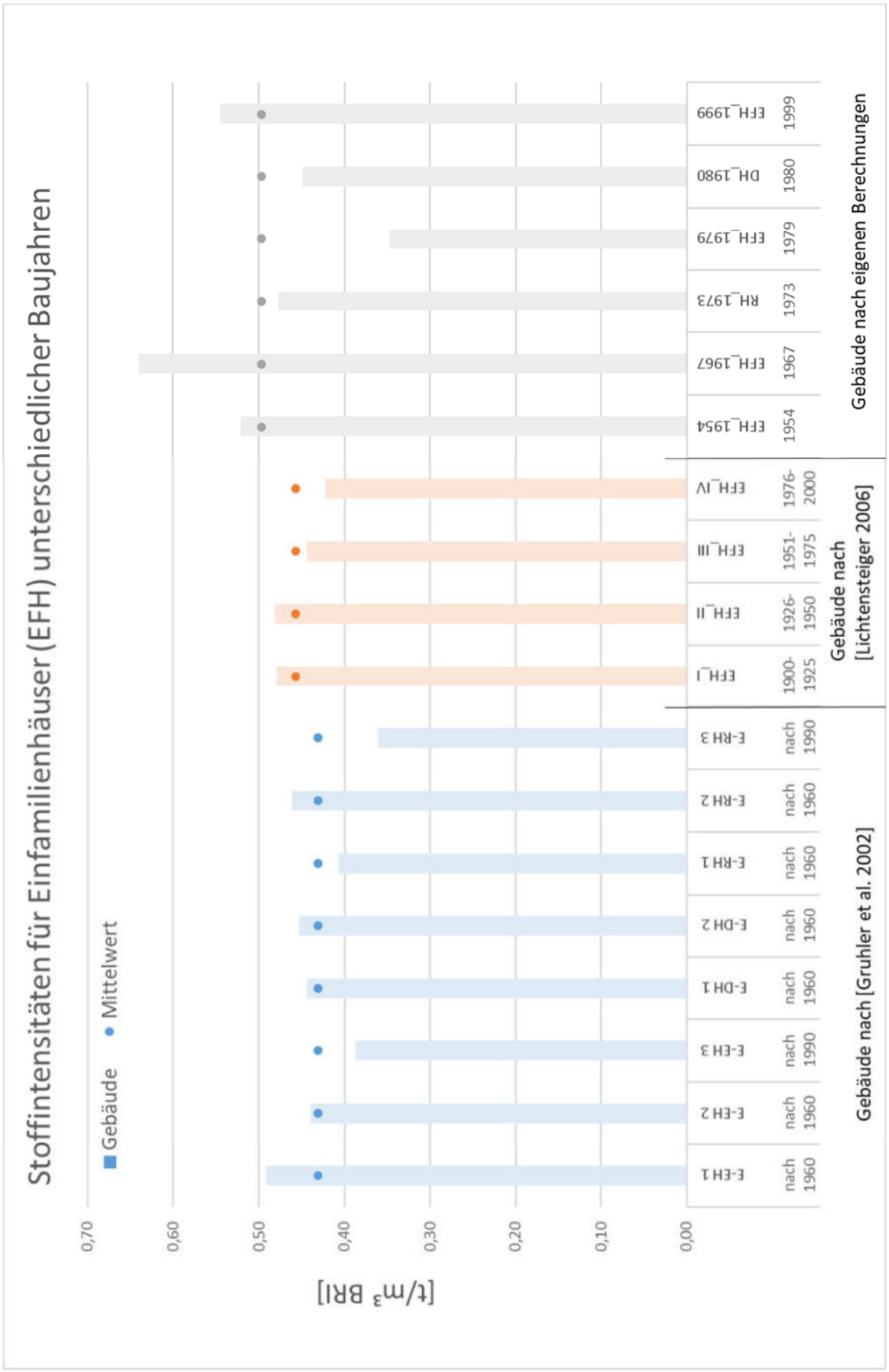


Abbildung 9 Vergleich Stoffintensität für EFH, Bestandsgebäude

4.4 Methode der Bestimmung von spezifischen Materialkennwerten für Neubauten

Für die Bestimmung der Materialkennwerte bei Neubauten wird sich der Eingangsdaten von Gebäudeökobilanzen bedient. Die Gebäudeökobilanzierung ist in Kapitel 6 dargestellt. Für die Erstellung einer Gebäudeökobilanz ist eine detaillierte Aufstellung der im Gebäude verbauten Materialmengen Voraussetzung. Die Datenbasis wird hier analysiert um die Materialkennwerte für Neubauten ermitteln zu können.
Im Rahmen des Projekts „Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren“ (Hafner et al. 2017) wurde eine Vielzahl an Gebäudeökobilanzen für Neubauten durchgeführt. So wurde eine Gebäudedatenbank mit insgesamt 46 Gebäuden erstellt. Diese Datenbank enthält geplante und gebaute Gebäude sowie Gebäudependants. Gebäudependants sind funktionell äquivalente Gebäude, die aber mit einem anderen Konstruktionstypen erzeugt wurden. Tabelle 5 beschreibt die Art der Gebäudedaten, die im Rahmen des Projekts verwendet wurden.

Tabelle 5: Beschreibung der Art der Gebäudedaten (Hafner et al. 2017)

Status	Konstruktion	Beschreibung	Datenherkunft	Bezeichnung	Kürzel
geplant	Holz (H)	Dokumentationen über den Gebäudeentwurf liegen vor (Grundrisse, Ansichten, etc.), Gebäude wurde jedoch nicht abschließend gebaut	Architektur- und Planungsbüros	„Original“	Gebäude-nr._H
gebaut	Holz (H)	Dokumentationen der Gebäude liegen vor (Grundrisse, Werkpläne, EnEV-Nachweis, etc.), Gebäude wurde gebaut	Architektur- und Planungsbüros	„Original“	Gebäude-nr._H
gebaut	Mineralisch (M)	Dokumentationen der Gebäude liegen vor (Grundrisse, Werkpläne, EnEV-Nachweis, etc.), Gebäude wurde gebaut	Architektur- und Planungsbüros	„Original“	Gebäude-nr._M
Durchschnittshaus	Holz (H)	Dokumentation über Durchschnittsgebäude (Partnerunternehmen BdF)	BdF-Studie (Achenbach und Rüter 2016)	„Original“	Gebäude-nr._H
erzeugt	Mineralisch (M)	Gebäude wurde auf Grundlage der Unterlagen der „Original“ Gebäude erzeugt	-	„Pendants“	Gebäude-nr._M

„Die Gebäudeinformationen der „Original“-Gebäude stammen aus Architektur- und Planungsbüros sowie aus einer Studie (Achenbach und Rüter 2016), in der Daten von Partnerunternehmen des Bundesverbandes Deutscher Fertigbau e.V. (BdF) erfasst und auf ein einzelnes Gebäude bezogen wurde. Das Gebäude stellt ein Durchschnittsgebäude dar und repräsentiert ein durchschnittliches Fertighaus von 13 Partnerunternehmen des BdF in Holztafel- und Holzskelettbauweise. Standort der analysierten Gebäude ist Deutschland und Österreich“ (Hafner et al. 2017).

„Die zur Berechnung der vollständigen Aufwendungen während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu Grunde gelegten Typvertreter-Wohnen in der LEGEP Software/Datenbank wurden dahingehend untersucht, ob sie mit ihren Annahmen zur Gebäudeplanung repräsentativ die Allgemeinheit der entsprechenden Gebäudetypen in Deutschland abbilden. In einem ersten Schritt wurden die Flächen und Kubatur der Typvertretergebäude mit entsprechenden Gebäuden, die in der Objektdatenbank des Baukosteninformationsdienstes Deutscher Architektenkammern (BKI), KOSTENplaner Version 10 mit Baukostendatenbank 2007/2008 enthalten sind, verglichen. In einem zweiten Schritt wurden auch die Mengengerüste der Grundtypen Einfamilienhaus (EFH), Doppelhaushälfte (DHH) als Zweifamilienhaus (ZFH), Reihenmittelhaus (RMH) und Mehrfamilienhaus (MFH) mit entsprechenden Varianten aus LEGEP mit den EZFH und MFH der entsprechenden möglichen Vergleichsgebäude aus dem BKI verglichen. Die Plausibilitätsprüfung der Typvertreter „Wohngebäude“ durch die Daten der BKI-Dokumentation führte zu einem positiven Ergebnis. Weitere Differenzierungen wurden für den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“ durchgeführt“ (Hafner et al. 2017).

Alle Gebäude sowohl die „Original“-Gebäude als auch die Gebäudependants besitzen identische energetische Eigenschaften und entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Im Anhang A (S. 116) sind eine Übersicht der Gebäude mit den energetischen Eigenschaften sowie die Aufteilung der Konstruktionen dargestellt (Hafner et al. 2017).

Die Materialmengen sind für die folgenden 12 Baumaterialgruppen ermittelt worden:

- Mineralisches Baumaterial (ohne Glas und Metall)
- Pflanzliches Baumaterial, NAWARO, Primärkonstruktion
- Metall
- Kunststoffe, fossil
- Abdichtungen, Schutzschichten, Klebstoffe, Dachdeckungen, -dichtungen
- Bodenbeläge, Estriche
- Dämmstoffe (Schall/Wärme/Kühle)
- Putz, Ausbauplatten, Fassaden-, Deckenbekleidung
- Beschichtungen
- Technischer Ausbau - Materialien - Komponenten
- Transluzente Bauteile, Türrahmen, Türblätter, Fensterrahmen

Im Folgenden sind die ermittelten Materialmengen nach Materialgruppen innerhalb der Gebäudetypen aufsummiert und durch die Gesamt-BGF dividiert worden. Somit ist der Indikator der Materialintensität t pro m² berechnet worden. Im Folgenden werden die errechneten Durchschnittswerte sowie beispielhafte Detailauswertungen dargestellt.

4.4.1 Einfamilienhäuser und Zweifamilienhäuser

Die bilanzierten Einfamilienhäuser und Zweifamilienhäuser (EZFH), z. T. Doppelhäuser haben eine Wohnfläche zwischen 97 m² und 248 m² sowie 2-3 Etagen ohne Kellergeschosse. Die Gebäude wurden zwischen 2009 und 2012 geplant bzw. gebaut und erfüllen den aktuellen Stand der Technik bezüglich energetischer Eigenschaften sowie die Anforderungen an Brand- und Schallschutz. Die Holzgebäude spiegeln die aktuellen Konstruktionsweisen wider. Diese wurden in die Konstruktionstypen Holztafelbauweise, Massivholzbauweise und Holzfertigbau unterteilt. Die mineralischen Gebäude sind Standardkonstruktionen, wie sie aktuell gebaut werden. (Hafner et al. 2017)

Es werden vier Konstruktionsvarianten (Stahlbeton, Porenbeton, Kalksandstein, Hochlochziegel) analysiert. Im Anhang A (S. 116) sind die bilanzierten Gebäude der Kategorie EZFH mit Angaben zur Gebäudekonstruktion, dem Baujahr und dem entsprechenden U-Wert für jedes energetisch relevante Bauteil gezeigt. Es zeigt sich, dass die Gebäude und Gebäudependants mindestens die gesetzlichen Anforderungen nach EnEV-Standard 2009 erfüllen. Die Konstruktionsmaterialen der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 6 gebäudeweise dargestellt. (Hafner et al. 2017)

4.4.2 Mehrfamilienhäuser

Die bilanzierten Mehrfamilienhäuser (MFH) wurden zwischen 2006 und 2014 geplant bzw. gebaut. Die Gebäude haben 3 - 8 Etagen ohne Kellergeschoss und weisen eine Wohnfläche zwischen 488 m² und 4256 m² auf. Die Mehrfamilienhäuser erfüllen den aktuellen Stand der Technik bezüglich energetischer Eigenschaften sowie die Anforderungen an Brand- und Schallschutz (s. Anhang A (S. 116)). Die Holzkonstruktionen entsprechen dem aktuellen Holzbau. Es wird zwischen Holztafelbauweise und Massivholzbauweise unterschieden. Die mineralischen Gebäude sind aktuelle Standard-konstruktionen. Die Mehrfamilienhäuser werden in vier mineralische Konstruktionsvarianten (Stahlbeton, Porenbeton, Kalksandstein, Hochlochziegel) unterteilt. (Hafner et al. 2017)

Tabelle 7 zeigt die Konstruktionsmaterialen der einzelnen Bauteile gebäudeweise dargestellt. Die bilanzierten Gebäude der Kategorie MFH mit Angaben zur Gebäudekonstruktion, dem Baujahr und dem entsprechenden U-Wert für jedes energetisch relevante Bauteil ist in Anhang A (S. 116) dargestellt.

Tabelle 6: Bauteillisten der Gebäudekonstruktion (EZFH) (Hafner et al. 2017)

Kürzel	Konstruktion	Bauteile Konstruktion					
		1 Fundament	2 Außenwand	3 Innenwand	4 Decke	5 Dach	6 Balkon
1.1_H	Massivholz mit Zellulosedämmung	Stb. (ident.)	Massivholz mit Zellulosedämmung (Brettsperrholz)	Brettsperrholz	Holzbalken und Schüttung	Brettsperrholz mit Zellulosedämmung	nicht vorhanden
1.1_M1	Stb. u. Mineralwolldämmung		Stb. u. Mineralwolldämmung + VMZ* (zweischaliges Mauerwerk)	Stb.	Stb.	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	
1.1_M2	Stb u. WDVS		Stb u. WDVS	Stb.	Stb.	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	
1.1_M3	Hlz, einschalig		Hlz, einschalig	Stb.	Stb.	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	
1.1_M4	Porenbeton		Porenbeton	Stb.	Stb.	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	
1.1_M5	KS u. WDVS		KS u. WDVS	Stb.	Stb.	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	
1.2_H1	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident.)	HTB mit Mineralwolldämmung	Holzständer mit Gipskarton	Deckenbalken und Schüttung	Holzsparren mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.2_H2	Massivholz mit Mineralwolldämmung		Massivholz mit Mineralwolldämmung (Brettstapel)	Holzständer mit Gipskarton	Brettstapel	Brettstapel	
1.2_M1	Hlz u. WDVS		Hlz u. WDVS	KS	Stb.	Holzsparren mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.2_M2	Hlz, einschalig		Hlz, einschalig	Hlz	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.3_H	Massivholz mit Zellulosedämmung	Stb. (ident.)	Massivholz mit Zellulosedämmung (Brettsperrholz)	Brettsperrholz	Brettsperrholz	Brettsperrholz mit Zellulosedämmung	nicht vorhanden
1.3_M1	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Hlz	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.3_M2	KS u. WDVS		KS u. WDVS	KS	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.3_M3	Porenbeton		Porenbeton	Porenbeton	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.5_M	Hlz u. Dämmputz	Stb. (ident.)	Hlz u. Dämmputz	Hlz	Hlz (Hohlkörperdecke)	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.6_H	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident.)	HTB mit Mineralwolldämmung	Metallständer	Holzbalken mit Mineralwolle	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.6_M1	KS u. WDVS		KS u. WDVS	KS	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.6_M2	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Hlz	Hlz (Hohlkörperdecke)	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.7_H	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident.)	HTB mit Mineralwolldämmung	HTB, Metallständer	Holzbalken mit Mineralwolle	Holzstegträger mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.7_M1	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Hlz	Hlz	Hlz	
1.8_H	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident.)	HTB mit Mineralwolldämmung	HTB, Metallständer	Holzbalken mit Mineralwolle	Pfettendach (Kaltdach)	nicht vorhanden
1.8_M	Hlz, einschalig		Hlz, einschalig	Hlz	Hlz (Hohlkörperdecke)	Pfettendach (Kaltdach)	
1.9_H	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident.)	HTB mit Mineralwolldämmung	Holzständer	Holzbalken	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	nicht vorhanden
1.9_M	KS u. WDVS		KS u. WDVS	KS	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.9_M2	Porenbeton		Porenbeton	Porenbeton	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	
1.9_M3	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Hlz	Stb.	Pfettendach mit Mineralwolldämmung	

*VMZ: Außenwandkonstruktion mit Verblendmauerwerk (Vormauerziegel)

Tabelle 7: Bauteillisten der Gebäudekonstruktion (MFH) (Hafner et al. 2017)

Kürzel	Konstruktion	Bauteile Konstruktion					
		1 Fundament	2 Außenwand	3 Innenwand	4 Decke	5 Dach	6 Balkon
2.2_H	HTB u. WDVS	Stb. (ident)	HTB u. WDVS	Holzständer, Metallständer u. Stb.	Brettsperrholz plus Betonschicht (Holzbetonverbunddecken)	Brettsperrholz	Stahlkonstruktion (ident.)
2.2_M	Stb. u. WDVS		Stb. u. WDVS	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb.	
2.3_M	Porenbeton bzw. Stb u. WDVS	Stb. (ident)	Porenbeton bzw. Stb u. WDVS	Stb., KS	Stb.	Stb.	Stahlkonstruktion u. Betonfertigteil
2.4_M	KS u. WDVS	Stb. (ident)	KS u. WDVS	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb., Holzpfetten	Stahlkonstruktion
2.5_H	HTB mit Zellulose u. Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	HTB mit Zellulose und Mineralwolldämmung	Holzständer, Metallständer, Stb.	Brettsperrholz	Brettsperrholz	Brettsperrholz
2.5_M	Hlz u. WDVS		Hlz u. WDVS	Metallständer, Holzständer mit Mineralwolle, KS	Stb.	Stb.	Stb.
2.6_H	HTB mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	HTB mit Mineralwolldämmung	HTB (tragend), Metallständer (nichttragend), Holzstützen mit Gipskarton verkleidet	Konstruktionsvollholz (KVH)-Balken mit Steinwolle	Holzbalken u. Mineralwolle (Pultdach)	Stahlkonstruktion (ident.)
2.6_M	Porenbeton bzw. Stb. u. Mineralwolldämmung		Stb. (tragend) mit Mineralwolle, Porenbeton (nichttragend)	Stb. (tragend), Metallständer (nichttragend), Stb.-Stützen	Stb.	Holzbalken u. Mineralwolle (Pultdach)	
2.7_H	Massivholz mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	Massivholz mit Mineralwolldämmung	Massivholz, Holzständer	Brettsperrholz	Brettsperrholz u. Mineralwolle	Stahlkonstruktion (ident.)
2.7_M1	Porenbeton		Porenbeton	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb.	
2.7_M2	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb.	
2.7_M3	Hlz u. Mineralwolle-dämmung*		Hlz u. Mineralwolldämmung*	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb.	
2.9_H	HTB mit Zellulose u. Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	HTB mit Zellulose u. Mineralwolldämmung	Brettsperrholzplatten u. Holzständer	Brettsperrholz	Brettsperrholz	Stahl-/Holzkonstruktion
2.9_M	KS u. WDVS		KS und WDVS	Stb., KS	Stb.	Stb.	Stb.
2.10_H	Massivholz mit Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	Massivholz mit Mineralwolldämmung	Holzständer	Brettstapel	Holzbalken mit Mineralwolldämmung	Brettstapel
2.10_M1	Porenbeton		Porenbeton	Stb.	Stb.	Stb.	Stahlkonstruktion
2.10_M2	Hlz u. Dämmputz		Hlz u. Dämmputz	Stb.	Stb.	Stb.	Stahlkonstruktion
2.10_M3	Hlz u. Mineralwolldämmung		Hlz u. Mineralwolldämmung*	Stb.	Stb.	Stb.	Stahlkonstruktion
2.12_M	KS u. Mineralwolldämmung	Stb. (ident)	KS u. Mineralwolldämmung*	Stb., KS, Metallständer	Stb.	Stb. u.Holzpfetten	KS u. Stb.
2.13_M	Stb u. WDVS	Stb. (ident)	Stb u. WDVS	Stb. u. Metallständer	Stb.	Stb.	Stb.

*VMZ: Außenwandkonstruktion mit Verblendmauerwerk (Vormauerziegel)

4.4.3 Spezifische Materialkennwerte Neubauten

Einfamilienhäuser und Zweifamilienhäuser

In Tabelle 8 sind die Materialkennwerte für EZFH dargestellt. Die BGF der Gebäude liegt zwischen 127 m² und 379 m². Der BRI variiert zwischen 384 m³ und 1069 m³. Die Gebäude mit einer Holzkonstruktion weisen im Mittel ein Gewicht von 181 t bei Massivholzkonstruktionen und 132 t bei Holzständerkonstruktionen auf. Materialbedingt zeigen die mineralischen Konstruktionen im Mittel mit 313 t ein höheres Gewicht auf.

Die flächenbezogene Stoffintensität für Gebäude mit Holzkonstruktion liegt im Mittel bei 0,7 t/m² BGF und bei der volumenbezogenen Stoffintensität bei 0,2 t/m³ BRI. Die Gebäude mit einer mineralischen Konstruktion zeigen durchschnittlich eine doppelt so große flächenbezogene Stoffintensität (1,39 t/m² BGF) sowie volumenbezogenen Stoffintensität (0,5 t/m³ BRI) im Vergleich zu den Gebäuden mit Holzkonstruktion.

Tabelle 8 Materialkennwerte aller EZFH

Gebäude	BGF [m²]	BRI [m³]	Gewicht [t]	Stoffintensität [t/m² BGF]	Stoffintensität [t/m³ BRI]
1.2_H2_Massivholz	176	557	132,5	0,75	0,24
1.3_H_Massivholz	379	1069	279,4	0,74	0,26
1.1_H_Massivholz	215	577	131,2	0,61	0,23
1.8_H_HTB	224	564	160,8	0,72	0,29
1.7_H_HTB	127	384	95,8	0,75	0,25
1.6_H_HTB	190	483	118,0	0,62	0,24
1.2_H1_HTB	176	557	132,5	0,75	0,24
1.9_H_HTB	209	536	151,4	0,73	0,28
1.1_M2_Stb	215	577	305,2	1,42	0,53
1.1_M1_Stb	215	577	320,8	1,49	0,56
1.3_M3_Porenbeton	224	1069	436,7	1,95	0,41
1.1_M4_Porenbeton	176	577	238,1	1,35	0,41
1.9_M2_Porenbeton	215	536	245,8	1,14	0,46
1.3_M2_KS	379	1069	529,2	1,40	0,49
1.1_M5_KS	215	577	254,0	1,18	0,44
1.9_M1_KS	209	536	268,7	1,29	0,50
1.6_M1_KS	379	483	267,3	0,71	0,55
1.8_M_Hlz, einschalig	215	564	372,4	1,73	0,66
1.2_M2_Hlz, einschalig	209	557	241,3	1,16	0,43
1.1_M3_Hlz, einschalig	190	577	261,6	1,38	0,45
1.5_M_Hlz, Dämmputz	245	685	383,5	1,57	0,56
1.7_M_Hlz, Dämmputz	127	384	231,1	1,82	0,60
1.3_M1_Hlz, Dämmputz	379	1069	488,8	1,29	0,46
1.6_M2_Hlz, Dämmputz	190	483	256,4	1,35	0,53
1.9_M3_Hlz, Dämmputz	209	536	262,9	1,26	0,49
1.2_M1_Hlz, WDVS	176	557	275,2	1,56	0,49
1.6_M2_Hlz, Dämmputz	190	483	132,5	1,35	0,53

Abbildung 10 zeigt die flächenbezogene Stoffintensität der EZFH unterteilt nach Konstruktionstypen. Das Gebäude 1.3_M3 (Porenbeton) zeigt die maximale Stoffintensität mit 1,95 t/m² BGF. Die minimale Stoffintensität zeigt das Gebäude 1.1_H (Massivholz) mit 0,61 t/m² BGF. Die Stoffintensität der Konstruktionstypen Hochlochziegel (1,46 t/m² BGF), Porenbeton (1,48 t/m² BGF) und Stahlbeton (1,46 t/m² BGF) liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Eine geringere Stoffintensität zeigt der mineralische Konstruktionstyp Kalksandstein mit 1,14 t/m² BGF auf. Mit 0,7 t/m² BGF (Massivholz) und 0,71 t/m² BGF (Holzständerkonstruktion) weisen die Gebäude mit Holzkonstruktion einen geringfügigen Unterschied bei der flächenbezogenen Stoffintensität auf.

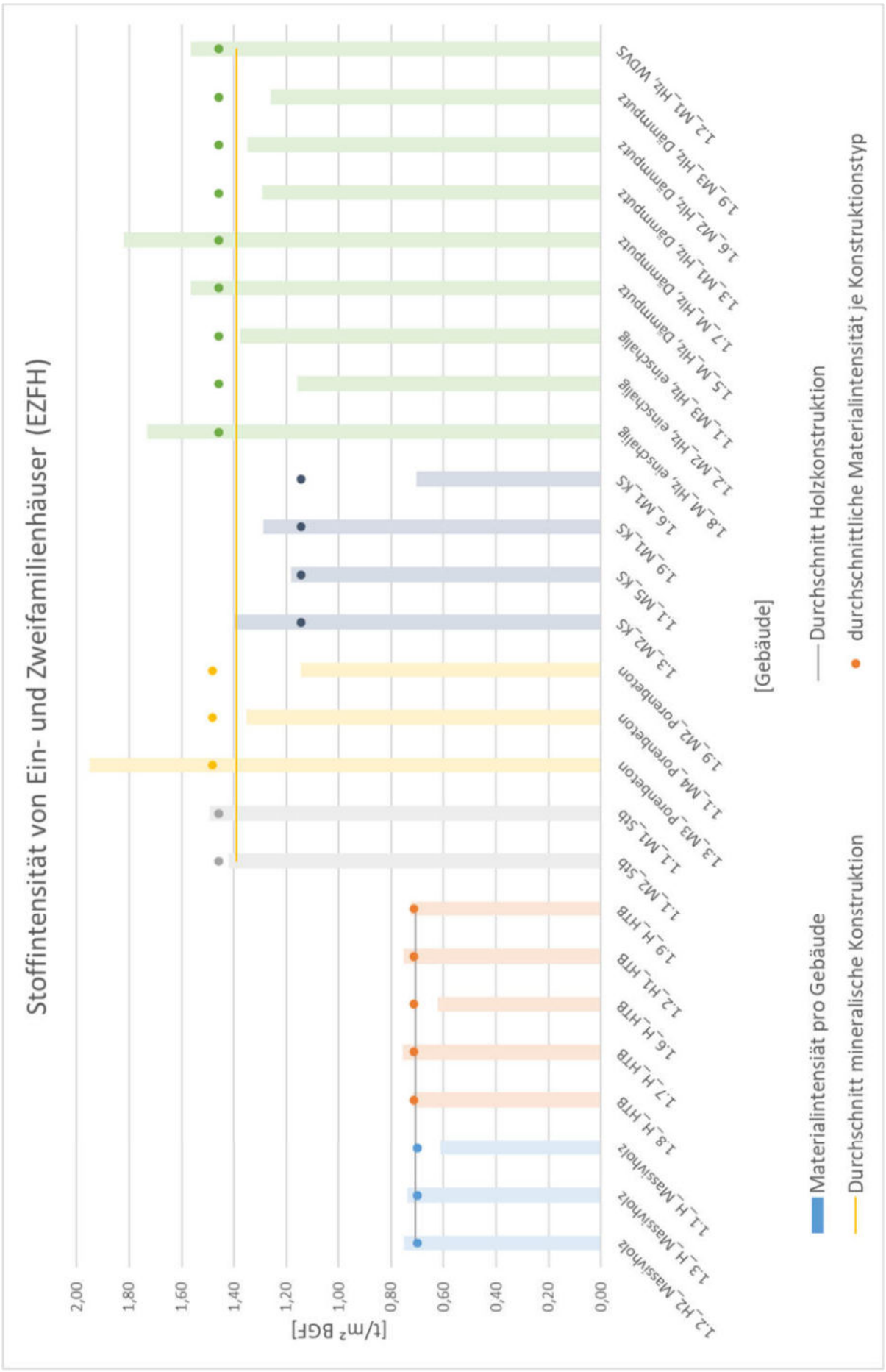


Abbildung 10 Stoffintensität von EZFH mit Durchschnittswerten im Neubau

Mehrfamilienhäuser

In Tabelle 9 sind die Materialkennwerte für MFH dargestellt. Die BGF der Gebäude liegt zwischen 723 m² und 7016 m². Der BRI variiert zwischen 2404 m³ und 21943 m³. Die Gebäude mit einer Holzkonstruktion weisen im Mittel ein Gewicht von 1878 t auf. Materialbedingt haben die mineralischen Konstruktionen im Mittel mit 3396 t ein höheres Gewicht.

Die flächenbezogene Stoffintensität für Gebäude mit Holzkonstruktion liegt im Mittel bei 0,75 t/m² BGF und bei der volumenbezogenen Stoffintensität bei 0,24 t/m³ BRI. Die Gebäude mit einer mineralischen Konstruktion zeigen durchschnittlich eine doppelt so große flächenbezogene Stoffintensität mit 1,44 t/m³ BRI sowie volumenbezogenen Stoffintensität (0,47 t/m³ BRI) im Vergleich zu den Gebäuden mit Holzkonstruktion.

Tabelle 9 Materialkennwerte aller MFH

Gebäude	BGF [m²]	BRI [m³]	Gewicht [t]	Stoffintensität [t/m² BGF]	Stoffintensität [t/m³ BRI]
2.10_H_Massivholz	723	2.404	437	0,60	0,18
2.7_H_Massivholz	2033	6.172	1448	0,71	0,23
2.5_H_HTB	6152	19.072	5299	0,86	0,28
2.9_H_HTB	1257	3.876	859	0,68	0,22
2.2_H_HTB	1394	3.965	1238	0,89	0,31
2.6_H_HTB	2717	8.646	1988	0,73	0,23
2.2_M_Stb	1394	3.965	2078	1,49	0,52
2.6_M_Stb	2717	8.646	2106	0,78	0,24
2.13_M_Stb	1348	3933	2541	1,88	0,65
2.10_M1_Porenbeton	723	2.404	1046	1,45	0,44
2.3_M_Porenbeton	7016	21.943	12566	1,79	0,57
2.7_M1_Porenbeton	2033	6.172	2617	1,29	0,42
2.4_M_KS	1478	4.277	2250	1,52	0,53
2.12_M_KS	1765	5363	2531	1,43	0,47
2.9_M_KS	1257	3.876	2106	1,68	0,54
2.10_M2_Hlz, Dämmputz	723	2.404	979	1,35	0,41
2.7_M2_Hlz, Dämmputz	2033	6.172	2465	1,21	0,40
2.5_M_Hlz, WDVS	6152	19.072	10946	1,78	0,57
2.10_M3_Hlz, MW	723	2.404	941	1,30	0,39
2.7_M3, Hlz, Mw	2033	6.172	2375	1,17	0,38

Abbildung 11 zeigt die flächenbezogene Stoffintensität der MFH unterteilt nach Konstruktionstypen. Das Gebäude 2.13_M (Stahlbeton) zeigt die maximale Stoffintensität mit 1,88 t/m² BGF. Die minimale Stoffintensität zeigt das Gebäude 2.10_H (Massivholz) mit 0,60 t/m² BGF.
Die Konstruktionstypen Hochlochziegel (1,36 t/m² BGF) und Stahlbeton (1,38 t/m² BGF) sowie Porenbeton (1,51 t/m² BGF) und Kalksandstein (1,54 t/m² BGF) zeigen in Mittel annährend identische Stoffintensitäten. Mit 0,66 t/m² BGF (Massivholz) und 0,79 t/m² BGF (Holzständerkonstruktion) zeigen die Gebäude mit Holzkonstruktion geringere Werte bei der flächenbezogenen Stoffintensität.

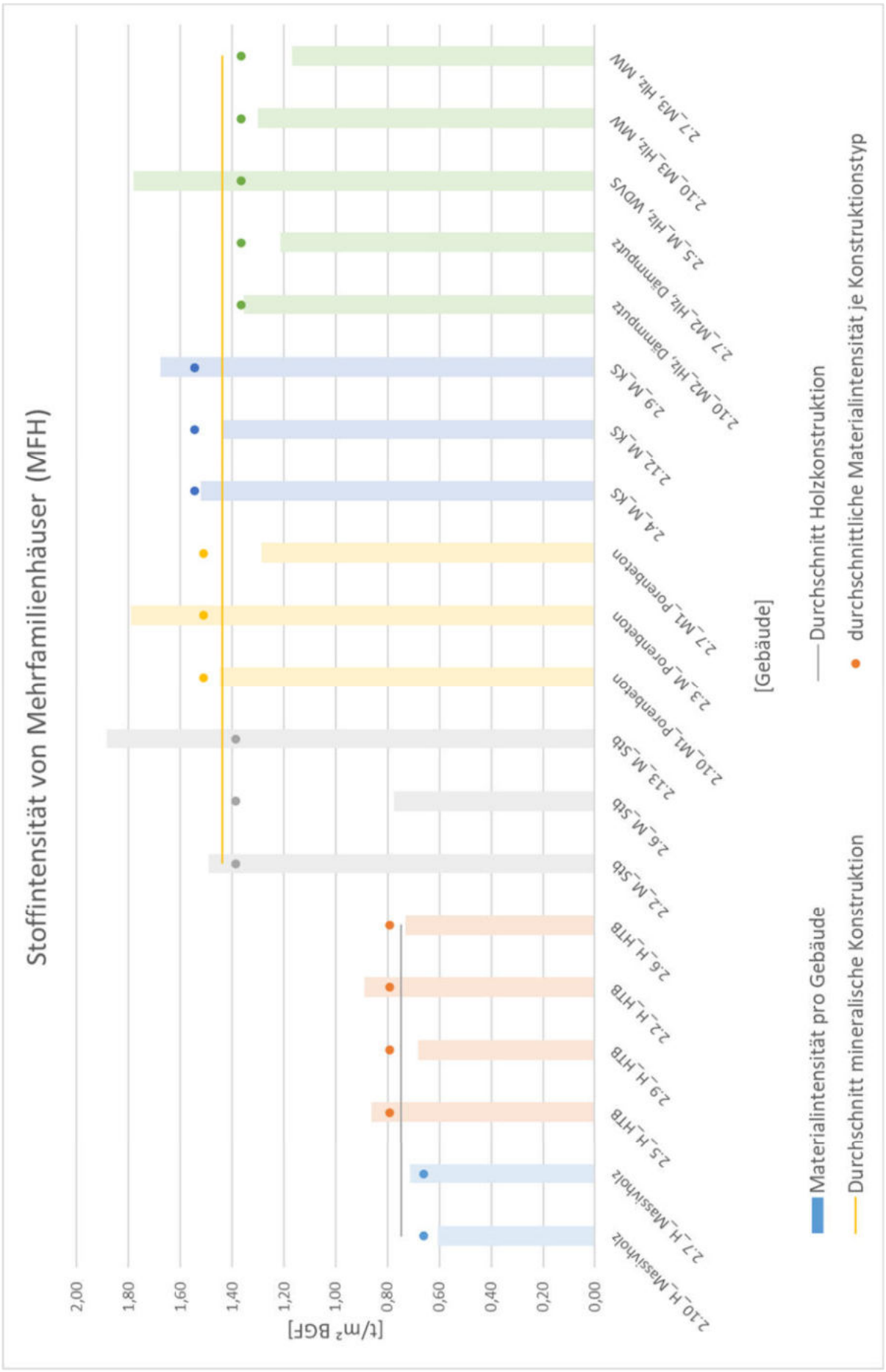


Abbildung 11 Stoffintensität von MFH mit Durchschnittswerten im Neubau

5 SCHADSTOFFE

5.1 Gesetzliche Grundlagen

Um Materialien möglichst hochwertig im Kreislauf zu führen sind mehrere Faktoren zu beachten. Entscheidende Rollen spielen der Stand der Technik bei den ausgeführten Abbruchverfahren, die in der Bausubstanz vorgefundenen Schadstoffe (s. Kapitel 5.2) sowie die Gesetzlichen Grundlagen bezüglich der Nutzung von Sekundärmaterialien. Eine Belastung der Abbruchmaterialien mit Schadstoffen ist ein Ausschlusskriterium für die hochwertige Nutzung der Materialien als Sekundärressource. Die für eine Wiederverwertung der anfallenden Materialien, auch die mit Schadstoffen belastetsten, und zur Gewährleistung einer Rückführung der Stoffe in den jeweiligen Stoffkreislauf zugrundeliegenden abfallrechtlichen Gesetze und Verordnungen sollen der Vollständigkeitshalber nachfolgend zusammengefasst dargestellt. Die Gesetze und Verordnungen die sich im speziellen auf die Schadstoffkomponente beziehen sind in Kapitel 5.2 genannt.

Auf europäischer Ebene regelt die umgangssprachlich genannte Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL), kurz Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008, unter anderem die Maßnahmen zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen. Ziele dieser Richtlinie sind das Vermeiden bzw. Verringern schädlicher Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen, die Reduzierung der Gesamtauswirkungen der Ressourcennutzung sowie die Verbesserung der Ressourceneffizienz (Richtlinie 2008/98/EG 2008).

Um die Grundsätze der europäischen Richtlinie auf nationaler Ebene umzusetzen, müssen mehrere Gesetze und Verordnungen miteinander verbunden bzw. berücksichtigt werden. Beispielsweise sind im Bauwesen bei Abbruch-, Umbau- und Sanierungsmaßnahmen nach (Schröder 2015) insbesondere folgende Rechtsbereiche zu berücksichtigen:

Umgang mit Abfällen:
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG),
- Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV),
- Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV),
- Altholzverordnung (AltholzV),
- Nachweisverordnung (NachwV) und
- Sonstige

Bodenschutz:
- Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) und
- Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG).

Immissionsschutz:
- Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).

Sonstige:
- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV),
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG),
- Deponieverordnung (DepV) und
- etc.

Nachfolgend werden die Gesetze und Verordnungen mit Bezug auf den Umgang mit Abfällen zusammenfassend erläutert. Das Rechtsgebiet der Entsorgung und oder Behandlung von Abfällen ist komplex und die unterschiedlichen Verordnungen untereinander verbunden. Einen Überblick über einige miteinander verzahnte Rechtsgebiete ist in Abbildung 12 dargestellt.

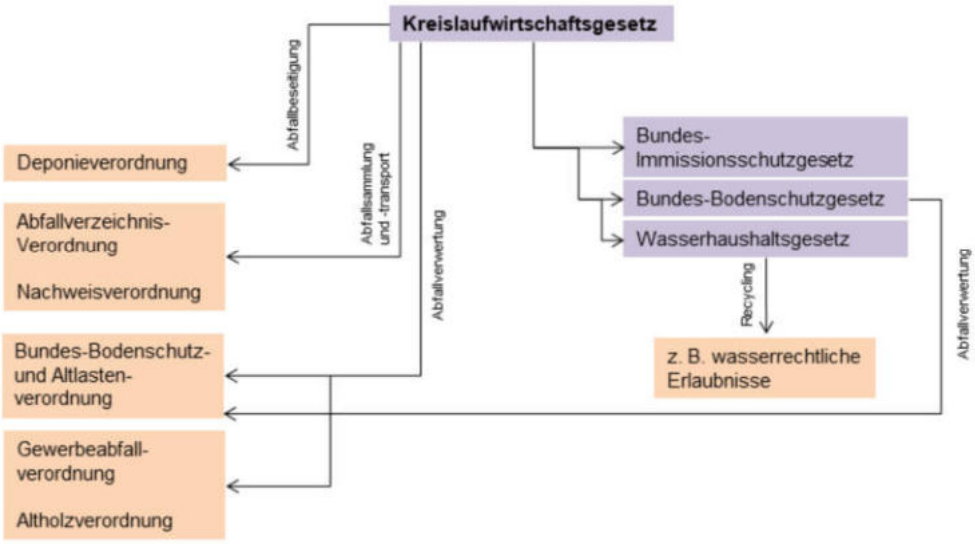


Abbildung 12 Verbindung verschiedener Rechtsgebiete im Abfallrecht, nach (Schröder 2015)

5.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das europäische Abfallrecht wurde mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24.02.2012 (letzte Überarbeitung im Juli 2017), in das deutsche Recht umgesetzt. Ziel ist die Stärkung von Kreislaufwirtschaft, Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen. Die Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und insbesondere auch den Schutz von Menschen und Umwelt bei der Erzeugung Bewirtschaftung der Abfälle soll gewährleiste werden. In Bezug auf Abbruch- und Sanierungsmaßnahmen werden im KrWG neben grundsätzlichen Begriffsbestimmungen auch speziell diejenigen Vorgaben definiert, die ein Abbruchunternehmer als Erzeuger, Besitzer, Händler, Makler, Sammler, Beförderer oder auch als Entsorger von Abfällen zu beachtet hat. Das Gesetz adressiert auch Hersteller, Vertreiber sowie Recyclingunternehmen, wo Abfälle nach dem Gebrauch eventuell begrenzte Zeit verbleiben.

Der Begriff Abfall wird in (Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) 2013) wie folgt definiert: „[…] Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.“

Insbesondere ist bei Abbruch- und Sanierungsmaßnahmen mit potenziell schadstoffbelasteten Bauteilen die Berücksichtigung des „Verschlechterungsverbot“. Welches besagt, dass Abfälle getrennt zu halten und zu behandeln sind. Vermischungen und Verdünnungen, gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen, Stoffen oder Materialien sind unzulässig. Speziell für gefährliche Abfallarten regelt § 48 des KrWG die besonderen Anforderungen an ihre Entsorgung und Überwachung der Stoffe während Baumaßnahmen (Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) 2013).

Der Umgang mit Abfällen (schadstoffbelastet oder nicht) ist ein Geflecht von ineinandergreifenden Gesetzen und Verordnungen. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz stellt ein Rahmengesetz dar auf dessen Grundlage die nachfolgend dargestellten Verordnungen erlassen wurden.

5.1.2 Abfallverzeichnis-Verordnung

Die Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) wurde im Dezember 2010 (letzte Änderung: 17. Juli 2017) aus dem europäischen Abfallverzeichnis heraus entwickelt und in die deutsche Rechtsprechung übernommen. Die AVV basiert auf dem KrWG und beinhaltet die Bezeichnung sowie die Einordnung der Abfälle hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit.

Abfälle werden durch eine sechsstellige Abfallschlüsselnummer definiert. Die ersten beiden Ziffern der Abfallschlüsselnummer stellen die Information über die Herkunft des Abfalls da. Die Ziffernfolge 17 XX XX bezeichnet die Abfälle speziell aus Abbruch und Umbaumaßnahmen. Die dritte und vierte Ziffer der Abfallschlüsselnummer kennzeichnet den branchentypischen Prozess, aus dem der jeweilige Abfall stammt. Beispielsweise charakterisiert die Abfallschlüsselnummer 17 01 Beton, Ziegle, Fliesen und Keramik aus Abbruch –und Umbaumaßnahmen. Die letzten beiden Ziffern dienen der numerischen Aufzählung. Die Abfallschlüssel zeigen auch auf ob es sich um gefährlich (mit einem * gekennzeichnet) oder ungefährliche Abfälle handelt. Die Einstufung in gefährliche Abfälle ist nach (Richtlinie 2008/98/EG 2008) vorzunehmen. (Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) 2013)

Speziell für die Beurteilung von Gebäudeschadstoffen wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ergänzend zur AVV eine Anwendungsempfehlung (Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung 2005) veröffentlicht. Es werden Grenzwerte zur Beurteilung der Abfälle basieren auf relevante gefährliche Inhaltsstoffe dargestellt um eine praxisorientierte Umsetzung der Verordnung zu unterstützen.

5.1.3 Gewerbeabfallverordnung

Mit der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) trat am 18.04.2017 eine Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen in Kraft. Es werden die im KrWG genannten Anforderungen an die genannten Branchen spezifiziert. Nach AVV sind damit die Abfälle mit den Abfallschlüsselnummern 17 XX XX (Bau- und Abbruchabfälle) und 20 XX XX (Siedlungsabfälle) gemeint (Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) 2017).

Im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere § 8 der GewAbfV interessant. Dieser beschreibt die Pflicht der getrennten Sammlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. In Anlehnung an der Verschlechterungsverbot aus dem KrWG wird spezifiziert, dass die Erzeuger und Besitzer von Bau- und Abbruchabfällen Abfallfraktionen jeweils getrennt zu sammeln, zu befördern und insbesondere vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen haben (Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) 2017). Wenn Abbruchabfällen in einem nicht trennbaren Gemisch vorliegen nach § 9 der GewAbfV gefordert eine Vorbehandlung für Abfälle, die überwiegend aus Kunststoffen, Metallen oder aus Holz bestehen, durchzuführen oder einer Aufbereitung (Abfälle, bestehend überwiegend aus Beton, Ziegel, Fließen oder Keramik) zuzuführen. Die GewAbfV fordert eine Dokumentation ab einem Gesamtvolumen von zehn Kubikmeter Abfall. Die Dokumentation muss bei Beginn der Baumaßnahme das vorgesehene Entsorgungskonzept beinhalten sowie die nach Abschluss der Baumaßnahem tatsächlich erfassten Abfallarten und -mengen ausweisen. (Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) 2017)

5.1.4 Altholzverordnung

Aufbauend auf § 10 des KrWG werden die Anforderungen an die Verwertung (stofflich oder energetisch) und die Beseitigung von anfallenden Holzabfällen in der Altholzverordnung (AltholzV) vom 15.08.2002 (letzte Änderung: 29.3.2017) geregelt. Generell wird in der AltholzV zwischen stofflicher und energetischer Verwertung unterschieden. Die Abfallfraktionen werden in Altholzkategorien unterteilt. Diese umfassen insgesamt 4 Gruppen sowie den Sonderfall PCB-Altholz (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) 2013):

- *Altholzkategorie A I:*
  naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde,
- *Altholzkategorie A II:*
  verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel,
- *Altholzkategorie A III:*
  Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel,
- *Altholzkategorie A IV:*
  mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten,

Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz und

- *Sonderfall: PCB-Altholz*
  Altholz, das PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung ist und nach deren Vorschriften zu entsorgen ist, insbesondere Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten.

Beispiele typischer in Bau- und Abbrucharbeiten vorkommender Althölzer sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Typische Althölzer bei Bau- und Abbruchabfällen, nach (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) 2013)

Altholz	**Altholzkategorie**	**Abfallschlüsselnummer gem. AVV**
Naturbelassenes Holz	A I	17 02 01
Behandeltes Vollholz (ohne schädliche Verunreinigung)	A II	17 02 01
Dielen, Türblätter, Zargen (ohne schädliche Verunreinigung)	A II	17 02 01
Konstruktionshölzer für tragende Teile, Holzfachwerk und Dachsparren (wenn behandelt)	A IV	17 02 04*
Imprägniertes Altholz aus dem Außenbereich (z. B. Bahnschwellen, Leitungsmasten, etc.)	A IV	17 02 04*
Altholz aus Schadensfällen (z. B. nach Brandschaden)	A IV	17 02 04*

Auch die (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) 2013) fordert bei dem Umgang mit Althölzern eine Getrennthaltungspflicht. Im speziellen ist erforderlich, dass sobald die Menge an Altholz 1 m³ loses Schüttvolumen oder 0,3 t pro Tag überschreitet, diese getrennt zu erfassen, zu sammeln und getrennt zu verwerten oder zu beseitigen. Dies greift insbesondre bei dem Umgang mit PCB-Altholz sowie kyanisiertes (mit Quecksilber behandeltes) oder teerölbehandeltes Altholz (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) 2013).

5.1.5 Nachweisverordnung

In der Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen – Nachweisverordnung (NachwV) - werden die Dokumentationspflichten aus dem KrwG, spezifiziert. Die Dokumentationspflichten betreffen die nicht gefährlichen Abfälle (bei Anordnung durch die zuständigen Behörden) aber insbesondere die gefährlichen Abfälle. Grundlegend werden mit der Verordnung die Abfallerzeuger, Beförderer, Entsorger und auch die Händler und Makler von Abfällen adressiert. Diese werden beim Umgang mit gefährlichen Abfällen zu einer elektronischen Nachweisführung verpflichtet. Gemäß § 25 der NachwV gibt es zusätzlich die Pflicht ein Register für nachweispflichtige Abfälle zu führen, die als Aufgabe des Erzeugers verstanden wird, wobei hier eine Übertragung der Registerpflicht an Dritte (z.B. Entsorger) möglich ist. (Schröder 2015; Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung - NachwV) 2006)

5.2 Schadstoffe in Wohngebäuden

Als Schadstoffe werden Stoffe bezeichnet, die für die Umwelt (Wasser, Boden, Luft) und alle darin lebenden Organismen eine schädliche Wirkung haben können. Das Gefährdungspotenzial eines Schadstoffes leitet sich aus den spezifischen (z.B. krebserregenden, toxischen oder erbgutschädigenden), akuten und chronischen Wirkungen des jeweiligen Stoffes ab (Berg und Zwiener 2014). Im Zuge von Sanierungs-, Rückbau- oder Umnutzungsmaßnahmen von Gebäuden kann das Vorhandensein von Schadstoffen nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Insbesondere in zurückliegenden

Bauepochen wurden zugelassene Baustoffe verbaut, deren Gefährdungspotential heute nachgewiesen ist. Schadstoffe können dabei nach (BMI 2018) auf unterschiedliche Weise Bestandteil eines Gebäudes sein:

- baustoffimmanent
(Schadstoffe, die in der Herstellung von Bauprodukten, Baustoffen und Einbauten vorliegen. In der Regel sind diese als Zuschlagsstoff oder als natürlicher Grundstoff enthalten),
- nutzungsbedingt
(Schadstoffe, die durch die objektspezifische Nutzung in die Bausubstanz gelangt sind),
- umweltbedingt
(Schadstoffe, die über die Luft als Gas, Aerosol oder Staub sowie über die Fauna eingetragen werden, weiterhin mikrobiologische Schädigungen durch Baumängel) und
- Sonderfall Brand
(Schadstoffe, die im Falle eines Brandschadens entstehen). (BMI 2018)

In den folgenden Abschnitten werden die relevantesten Schadstoffe der Bauindustrie, gegliedert in drei Hauptgruppen Mineralfasern, Organische Schadstoffe sowie Schwermetallen (Anorganische Schadstoffe), beschrieben. Neben den chemischen Eigenschaften werden der Einsatzbereich, Verwendungszeitraum sowie die gesundheitlichen Risiken speziell für den Menschen erläutert und Richt- bzw. Grenzwerte für die Bewertung wiedergegeben.

5.2.1 Mineralfasern

Asbest

Asbest ist ein anorganischer, kristallisierter Faserstoff, der aus natürlichen Mineralvorkommen gewonnen werden kann. Asbeste werden in zwei Hauptgruppen unterteilt. Einmal in die sogenannte „Serpentin-Gruppe“ welche auch als Weißasbest bezeichnet wird. Als Blauasbest bzw. Braunasbest wird die Gruppe der „Amphibole“ bezeichnet. Die Bezeichnungen lassen sich auf die Art des Ursprungsminerals zurückfuhren. Asbeste weisen eine faserförmige Ausprägung auf. Diese Fasern können in unterschiedliche Längen zwischen 0,1 mm bis mehrere Zentimeter vorliegen. Die Faserdicken können zwischen 0,001 mm bis mehrere Millimeterliegen. Innerhalb eines Asbestkristalls hängen die Fasern kompakt aneinander. Durch mechanische Einwirkungen besteht die Möglichkeit, dass sich die Einzelfasern lösen. Beispielsweise können aus 1 mg Asbest bis zu 10 Millionen Einzelfasern gewonnen werden. (Berg und Zwiener 2014)

In der Bauindustrie wurde Asbest aufgrund mehrerer positiven technischen Eigenschaften eingesetzt. Asbest ist hitzebeständig, säureresistent, hydrophob, elastisch, spinnbar sowie biopersistent. (Bossemeyer et al. 2016) Nach (Berg und Zwiener 2014) wurden in Deutschland 9 Milliarden m² Fläche mit asbesthaltigen Materialien verbaut. Hauptsächlich wurden asbesthaltige Materialien, aufgrund der beschriebenen Eigenschaften, in den Bereichen Brand-, Wärme und Schallschutz eingesetzt.

Nach den Technischen Regeln für Gefahrstoffe Nr. 519, kurz TRGS 519 („Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten“) werden Produkte in Abhängigkeit der Rohdichte und Asbestgehaltes in drei Arten unterteilt: Schwach gebundene Asbestprodukte (Rohdichte <1.000 kg/m³; Asbestgehalt 20-100 %), Fest gebundene Asbestprodukte bzw. Asbestzementprodukte (Rohdichte >1.400 kg/m³; Asbestgehalt <15 %) und sonstige Asbestprodukte (nicht eindeutig kategorisierbare Produkte). (Bossemeyer et al. 2016) Tabelle 11 zeigt Beispiele für asbesthaltige Produkte im Gebäude.

Tabelle 11 Beispiele für Asbestbauprodukte geändert nach (Berg und Zwiener 2014)

Asbesttyp	Asbestprodukt
Schwach gebundener Asbest Rohdichte < 1.000 kg/m³; Asbestgehalt 20-100 %	• Brandschutztüren • Leichtbauplatten • asbesthaltiger Putz • Asbestpappen/-schnüre
Fest gebundener Asbest (Rohdichte > 1.400 kg/m³; Asbestgehalt <15 %)	• Floor-Flex-Fußböden • Faserzementplatten • Lüftungsrohre • Fensterbänke • Dacheindeckungen

Seit 1942 sind die ersten berufsbedingten Erkrankungen durch Asbest bekannt und aktuell sterben jährlich offiziell über 1.500 Menschen durch Asbest ausgelöste Krankheiten. Als typische durch Asbest bedingte Krankheiten sind Asbestose, Chronische Lungenentzündung, Tumor des Rippenfells, Bauchfells oder Herzbeutels sowie Lungen –bzw. Kehlkopfkrebs zu nennen. (Berg und Zwiener 2014)

Bedingt der Erkanntnisse über die gesundheitlichen Risiken wurden 1979 die ersten Verwendungsbeschränkungen von Asbest eingeführt, die sich bis 1993 zu einem deutschlandweiten Asbestverbot ausgeweitet haben (Bossemeyer et al. 2016).

Die Anwesenheit eines Asbestproduktes bedingt noch keine zwangsläufige Gesundheitsgefahr. Aktuell ist in Deutschland noch eine Vielzahl an Asbestprodukte in Bestandsbauten vorhanden, die nicht notwendig entfernt werden müssen. Ein entscheidender Faktor ist die Art des Produktes, als ob es sich um ein schwach- oder festgebundenes Material handelt, und welche potenzielle Faserfreisetzung davon ausgeht.

In Nordrhein-Westfalen wurde 1996 eine „Asbest-Richtlinie“ eingeführt, in der die Gefährdungsbeurteilung und die Feststellung der Sanierungsdringlichkeit regelt ist. Es wurde festgesetzt, dass die schwach gebundenen Asbestprodukte in Abhängigkeit einer Dringlichkeitseinstufung zu sanieren sind. Festgebundene Asbestprodukte sind von einer Sanierungspflicht ausgenommen. Die Zuordnung der Dringlichkeitsstufe einer potentiellen Asbestsanierung ist dabei von der Asbestart, Oberflächenstruktur des Asbestproduktes, Zustand des Asbestproduktes im Hinblick auf mögliche Beschädigungen, Beeinträchtigung des Asbestproduktes, Raumnutzung und Einbauort des Asbestproduktes abhängig. (Bossemeyer et al. 2016)

Künstliche Mineralfasern

Künstliche Mineralfasern (KMF) werden industriell aus mineralischen Rohstoffen hergestellt. Hauptsächliche werden Glas oder Gestein unter Zugabe eines Zuschlagstoffes, früher auch Schlacken, für die Herstellung verwendet. (Bossemeyer et al. 2016)

Mineralwollen aus Glas kann bis zu 70 % aus Altglas bestehen. Herbei spricht man von Glaswolle welche durch die weiße Färbung gekennzeichnet ist. Eine gelbliche Färbung lässt den Rückschluss zu das es sich um Steinwolle handelt, welche hauptsächlich aus Gestein Basalt oder Diabas besteht.

Schlackenwolle wird aus Abfallprodukten bei Verbrennungsprozessen hergestellt, wobei die entstehende Hochofenschlacke zu künstlichen Mineralfasern gesponnen und gebunden wird. Zudem können verschiedene Inhaltsstoffe (z.B. Schwermetalle) enthalten sein. Im Vergleich zu den anderen beiden Mineralwollen sind KMF aus Schlacken eher bräunlich gefärbt. In Gebäuden wurden die KMF-Produkte dominierend für den Schall- und Wärmeschutz in Innenwänden, Decken, Dächer oder als Trittschalldämmung verwendet. Insbesondere in Kellerräumen können Leitungsrohre mit KMF-haltigen Materialien isoliert worden sein. Die Bandbreite ist hier ebenso vielfältig wie bei den vorgenannten Asbestprodukten. (Berg und Zwiener 2014)

Bis 1996 ist die so genannte „Alte Mineralwolle“ produziert worden, die nachweislich gesundheitlichen Risiken, wie z.B. chronische und akute Toxizität (krebserzeugend, Haut- und Juckreiz) sowie Biobeständigkeit aufweisen kann. Vergleichbar mit den Asbestfasern sind diese aufgrund der sehr feinen Struktur lungengängig. Zusätzlich besitzen die Fasern die Eigenschaft der Biopersistenz welche ebenfalls eine krebserzeugende Wirkung begünstigt, da die Verweildauer der Fasern im biologischen Gewebe einen langen Zeitraum einnehmen kann. (Berg und Zwiener 2014; Bossemeyer et al. 2016) Am 01.06.2000 trat in Deutschland das Verwendungsverbot von „Alter Mineralwolle“ (Herstellungs- und Verwendungsverbot für alte Mineralwolle gemäß Gefahrstoffverordnung) in Kraft. (Bossemeyer et al. 2016)

Um festzustellen, ob es sich bei einem Produkt um „Alte Mineralwolle“ handelt bzw. welche potenziellen gesundheitlichen Risiken von dem Produkt ausgehen, kann die Technischen Regel für Gefahrstoffe 905 (TRGS 905: Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe) als eine Bewertungsgrundlage herangezogen werden. Anhand des Kanzerogenitätsindex (KI) wird ein Bewertungsmaßstab für KMF-Produkte geschaffen. (TRGS 905 2016)

Eine generelle Sanierungspflicht der KMF-Produkte besteht in Deutschland nicht. In (Berg und Zwiener 2014) und (Moriske und Szewzyk 2008) wurden in Form von Leitfäden Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit der Faserkonzentration in der Raumluft bereitgestellt.

5.2.2 Organische Schadstoffe

Holzschutzmittel

Speziell in den 1960er und 1970er Jahren wurde für den Bau von Gebäuden zunehmend Holz verbaut. Um den Baustoff Holz vor Wertminderung und Zerstörung zu schützen, stieg auch der Bedarf an Holzschutzmittel an. Holzschutzmittel wurden sowohl für die direkte Bekämpfung eines vorhandenen Schädlingsbefalls als auch vorbeugend eingesetzt. Um den Schutz zu gewährleisten wurden vorzugsweise chemische Holzschutzmittel verwendet, welche im Hinblick auf die Komponenten in die zwei Gruppen, Insektizide (Schutz vor Insekten) und Fungizide (Schutz vor Pilze), unterteilt sind. Hauptsächlich wurden Holzschutzmittel antragenden oder aussteifenden Bauteilen eingesetzt und waren hier auch verbindlich vorgeschrieben. Um einen vollständigen Schutz der Holzbauteile zu erreichen kamen Insektizide und Fungizide in Kombination zum Einsatz. (Berg und Zwiener 2014) Die drei geläufigsten bekanntesten Holzschutzmittelwirkstoffe Pentachlorphenol (PCP), Lindan (γ-HCH) und Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) nachfolgend tabellarisch dargestellt (s. Tabelle 12)

Tabelle 12 Eigenschaften der geläufigsten Holzschutzmittel; nach (Berg und Zwiener 2014)

Holzschutzmittelwirkstoff	Eigenschaften und Verwendung
Pentachlorphenol (PCP)	Stoffliche Eigenschaften: • gehört zur Gruppe der chlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffe • Verbindung aus Phenol und 5 Chloratomen • in Wasser schwer löslich • Dichte: 1,98 g/cm³ • weist fungizide Wirkungen auf • PCP-Gehalt im Holzschutzmittel etwa 5 Masse-%
	Verwendung: • ab 1945 Beginn der industriellen Herstellung • als Anstrich auf Holzoberflächen speziell beitragenden und aussteifenden Hölzern (max. PCP-Gehalte sind oberflächennah auf den ersten 3-5 mm messbar) • Vorkommen: Dachstuhl, Treppen, Geländer, Fenster, Türen, Fußböden, Holzverkleidungen • 1986 Verbot der Anwendung PCP-haltiger • Holzschutzmittel in Innenräumen • 1989 Pentachlorphenolverbotsverordnung

Pentachlorphenol (PCP)	Gesundheitsrisiken: • der Mensch kann das PCP in erster Linie über die Atmung aufgrund der gasförmigen Ausbreitung in der Raumluft aufnehmen; eine Aufnahme über die Haut durch direkten Kontakt mit dem belasteten Material oder über die Nahrungsaufnahme ist ebenfalls möglich. • Krebserzeugend und mutagen • reproduktionstoxisch • Müdigkeit, Kopfschmerzen, Ekzeme, Konzentrationsstörungen, Schlafstörungen, Depressionen, etc. • Schädigung des Immun- und Nervensystems
	Richt- bzw. Grenzwerte: Innenraumluft: • Vorsorgewert: 0,1 µg/m³ • Gefahrenwert unbewohnter Bereich: 1 µg/m³ Hausstaub: • unbelastet: < 1 mg/kg • normal: 0,2 mg/kg • auffällig: 1,5 mg/kg
Lindan (γ-Hexachlorcyclohexan (HCH))	Stoffliche Eigenschaften: • gehört zur Gruppe der chlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffe • Verbindung aus Hexan und 6 Chloratomen • weist insektizide Wirkungen auf • Konzentration kann bis zu 100 mg Lindan pro kg Holz betragen • Ausgasungsvermögen in die Raumluft
	Verwendung: • wurde meist mit PCP kombiniert • 1982 starker Rückgang • kein Verwendungsverbot in Deutschland als Holzschutzmittel
	Gesundheitsrisiken: • geringe chronische Toxizität • hohe akute Toxizität • nerven- und nierenschädigende Wirkungen • krebserzeugende Wirkung
	Richt- bzw. Grenzwerte: Innenraumluft: • Vorsorgewert: 0,1 µg/m³ • Gefahrenwert: 1 µg/m³ Hausstaub: • normal: < 0,1 mg/kg • auffällig: 0,3 mg/kg • hoch: 3 - 15 mg/kg
Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT)	Stoffliche Eigenschaften: • Verbindung aus Chlorbenzol und Chloralhydrat • weist insektizide Wirkungen auf
	Verwendung: • diente in Kombination mit Lindan meist der Imprägnierung von Dachstühlen • auch in Einbauten oder Möbeln in Innenräumen • 1972 Verwendungsverbot in Deutschland • bis 1991 Gebrauch in der ehemaligen DDR
	Gesundheitsrisiken: • leber- und nierenschädigend • neurotoxische Wirkung (Schwindel, Krampfanfälle und Lähmungen)
	Richt- bzw. Grenzwerte: Innenraumluft: • Vorsorgewert: 0,3 µg/m³ • Gefahrenwert: 3 µg/m³ Hausstaub: • normal: < 0,3 mg/kg • auffällig: 0,7 mg/kg

Polychlorierte Biphenyle

Seit 1929 kann Polychlorierten Biphenyle (PCB) industriell hergestellt werden. PCB entsteht durch eine synthetische Verbindung von Biphenyl und chlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffen. PCB ist schwer wasserlöslich sowie thermisch sehr stabil. Als Endprodukt kann eine farblose bis gelbliche Flüssigkeit oder auch ein gelbes Weichharz erzeugt werden. Bedingt durch unterschiedliche Herstellungsverfahren können verschieden stark chlorierte Biphenyle bzw. diverse PCB-Gemische entstehen. In der Industrie und Bausektor wurde PCB hauptsächlich in zwei Systemen eingesetzt. Einmal im geschlossenen System in Transformatoren und Kondensatoren. Als ein Beispiel sind hier Leuchtstofflampen zu nennen. In offenen Systemen wurde PCB als Dichtmassen, Farben und Anstriche sowie Klebstoffe eingesetzt. Deutschlandweit beträgt die verzeichnete PCB-Menge ca. 84.000 t, davon 60.000 t in geschlossenen und 24.000 t in offenen Systemen. (Berg und Zwiener 2014) Im Bausektor wurde PCB hauptsächlich als Weichmacher in Dichtmassen, wobei der Gehalt bis zu 30 Masse-% betragen kann, eingesetzt. (Bossemeyer et al. 2016)

Der Mensch kann PCB oral durch eventuell gelöste Partikel aufnehmen. PCB zählt zu den gefährlichsten Umweltgiften. PCB hat eine potenziell chronische Gesundheitsschädigende Wirkung bei Menschen. Dazu zählen krebserzeugende, reproduktionstoxische sowie neuro-, immun- und lebertoxische Wirkungen. Der Hauptanwendungszeitraum lässt sich auf die 1960er und 1970er datieren. 1978 trat das erste Verwendungsverbote durch die Bundes-Immissionsschutzverordnung in Kraft. Die Herstellung von PCB wurde in Deutschland ca. 1983 eingestellt. (Bossemeyer et al. 2016; Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit Nordrhein-Westfalen 2004) Seit 1994 ist der Umgang mit PCB-haltigen Baumaterialien in PCB-Richtlinien geregelt. (Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle und halogenierter Monomethyldiphenylmethane 2013)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) kommen natürlich in fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl) oder Naturasphalt vor. PAK können aber auch durch Erhitzen bzw. Verbrennen von organischem Material unter Sauerstoffmangel oder durch thermische Spaltungen (Pyrolyse) entstehen. Rein chemisch betrachtet werden unter PAK Kohlenstoffverbindungen zusammengefasst, die aus mehreren miteinander verbundenen Benzolringen bestehen. (Berg und Zwiener 2014)

Die Stoffgruppe der Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe umfasst ca. 10.000 unterschiedliche Verbindungen. Davon sind 16 Einzelverbindungen bei umwelthygienischen Fragestellungen zu Berücksichtigen. Im Entstehungsprozess treten PAK immer als Gemisch auf und sind in Wasser schlecht lösbar. (Umweltbundesamt 2016b) (Berg und Zwiener 2014)

Im Bausektor kommen hohe PAK-Konzentrationen hauptsächlich in Teerprodukten (z. B. Steinkohlenteer) vor, die als zähes Material bei der Verkokung von Steinkohle, Braunkohle oder Holz entstehen. Die positive Eigenschaft von PAK Produkten lag der Funktion Abdichtungen gegen Feuchte zu schaffen. (Bossemeyer et al. 2016)

In Tabelle 13 sind Beispiele für PAK-haltige Bauprodukte sowie deren Verwendungszeiträume dargestellt.

Tabelle 13 Beispiele von PAK-haltigen Produkten und deren Verwendungszeitraum, nach (Berg und Zwiener 2014)

Anwendungsbereich	**Produktbeispiele u. Verwendungszeitraum**
Abdichtungen gegen Feuchte	Dachbahnen bis ca. 1979 Anstrich bis ca. 1979
Schall- und Wärmeschutz	Teerkork bis ca. 1965
Holzschutz	Teeröle bis ca. 1991
Klebstoffe	Parkettkleber bis ca. 1979
Estrich	n.b.
Korrosionsschutz	z.t. bis 2000

Eine potenzielle Gefährdungsbeurteilung bezüglich PAK-haltiger Produkte ist in (TRGS 551 2015) beschrieben. Der Wirkungspfad kann analog zu den v. g. Schadstoffgruppen ebenfalls oral, inhalativ oder

dermal erfolgen. Je nach Höhe der Exposition kann es zu chronischen Erkrankungen wie beispielsweise Hautentzündungen, Atembeschwerden, Störungen des zentralen Nervensystems, Kopfschmerzen, Erbrechen, Fieber, Nierenreizungen oder Schwindelanfällen führen. (Berg und Zwiener 2014) 1991 wurde die erste Teerölverordnung in Deutschland eingeführt, die ein Verbot hinsichtlich der Abgabe teerölhaltiger Holzschutzmittel aufzeigt. Die letzthin eingeführten Verbote bzw. Einschränkungen sind 2006 in der so genannten REACH-Verordnung eingeführt worden. (Merenyi 2014)

Formaldehyd

Formaldehyd gehört zu der Gruppe der leichtflüchtigen organischen Verbindungen (very volatile organic compounds; kurz VVOC) und setzt sich aus den chemischen Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zusammen. (Berg und Zwiener 2014)

In den 1970er Jahren wurden die durch Formaldehyd ausgehenden Innenraumbelastungen bekannt. Formaldehyd diente ursprünglich als Konservierungsmittel und wurde darauffolgend in Holzleimen und Klebern für Holzwerkstoffe eingesetzt. Insbesondere in den 60er und 70er Jahren wurden zunehmend Fertighäuser in Holzrahmenbauweise gebaut, wodurch auch formaldehydhaltige Harze zur Verleimung von Holzplatten vermehrt ihren Einsatz fanden. Noch heute gibt es eine Vielzahl von Produkten, die Formaldehyd enthalten und das Potenzial haben den Schadstoff in die umgebende Raumluft freisetzten. Die Verwendung von Formaldehyd ist, im Gegensatz zu den bereits genannten Schadstoffgruppen, noch heute gestattet (Zwiener 2007).

Hauptquellen der Belastungen in Innenräumen sind Holzwerkstoffe da diese mit Bindemittel verleimt werden. Die wichtigsten Hauptquellen in Innenräumen stellen demnach sämtliche mit Bindemittel verleimte Holzwerkstoffe dar. Nachfolgend sind nach (Berg und Zwiener 2014) Produktbeispiel für Formaldehydquellen aufgelistet:

- Holzwerkstoffe
    - Spanplatten
    - Mitteldichte Faserplatten (MDF-Platten)
    - Hartfaserplatten
    - OSB-Platten (oriented strand board)
    - Sperrholz
- Klebstoffe, Lacke und Parkettversiegelungen
    - Formaldehydharze als Holzklebstoff
    - Säurehärtende Lacke auch für Parkettversiegelungen
- Topfkonservierer und Tapeten
    - formaldehydhaltige Konservierungsstoffe zum Schutz vor mikrobiellem Verderb
    - formaldehydhaltige Kunstharze an Tapeten und Raufasertapeten
- UF-Ortschaum
    - Isolierung, bestehend aus wässrigen Harnstoff-Formaldehyd-Lösungen
- Dämmmaterialien
    - formaldehydhaltige Bindemittel in Mineralwolldämmstoffen
- Fertighäuser
    - großflächige Belastungsquelle der Holzrahmenbauweise

Spanplatten die beispielsweise zur Bekleidung von Innenwänden, Decken oder Fußböden genutzt werden haben in der Regel einen Anteil von bis zu 10 Vol.-% an Bindemittel, wobei dieser aus ca. 85 % Formaldehyd-Harz bestehen kann. Auch Hartfaserplatten (z. B. Schrankrückwände) können bis zu 3 Vol.-% an Formaldehyd-Harz enthalten. Die Freisetzung von Formaldehyd ist abhängig von der Bindemittelart, der eingesetzten Menge und raumklimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchte). Bis 2014 war Formaldehyd in der EU als vermutlich krebserzeugend eingestuft. Basierend auf neuen Erkenntnissen ist es heute als potenziell krebserzeugend (z.B. Tumore in der Nasenhöhle und Schleimhautschädigung) eingestuft. Es besteht kein Verwendungsverbot. Zur Beurteilung der Formaldehydkonzentration sind Richtwerte für die Innenraumkonzentration hereinzuziehen. (Berg und Zwiener 2014)

Flüchtige organische Verbindungen

Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds; kurz VOC) charakterisieren gasförmige Stoffe, die ihren Siedebereich zwischen 50 - 260° C haben. In Innenräumen konnten bis heute mehr als 100 chemische Verbindungen dieser Art nachgewiesen werden. VOC setzten sich aus Stoffen wie Kohlenwasserstoff, Alkohol, Aldehyd und organischen Säuren zusammen. Ebenso können VOC aus biologischen Prozessen, beispielsweise Pflanzenstoffwechsel, entstehen. VOC sind hauptsächlich in Farben, Lacken, Klebstoffe, Grundierungen und Lösemittel enthalten. (Berg und Zwiener 2014) In Tabelle 13 sind die gängigsten VOC-Verbindungen mit Ihren Eigenschaften und Vorkommen dargestellt.

Durch Verdunstung von Lösemittel oder Austrocknung flüssiger Produkte gelangen VOC in die Luft. Beim Menschen können potenzielle Auswirkungen in Form von Kopfschmerzen, Ermüdungserscheinungen, Reizungen der Augen, Rachen oder Nase bzw. erhöhte Infektanfälligkeit im Bereich der Atemwege äußern auftreten.

Für die Bewertung von VOC Konzentrationen bestehen keine gesetzlich festgelegten Grenzwerte oder Verwendungsverbote. Das Umweltbundesamt stellt für ausgewählte Verbindungen Vorsorge- und Gefahrenrichtwerte bereit, die als Grundlage für eine Gefährdungsbeurteilung herangezogen werden können (Berg und Zwiener 2014).

Tabelle 14 Eigenschaften und Vorkommen gängiger VOC-Verbindungen, nach (Berg und Zwiener 2014)

Verbindung	Eigenschaften	Vorkommen
Acrylate	sensibilisierend	Acrylharze in Farben, Klebstoffen und Dichtmassen
Aldehyde	z. T. reizend, geruchsintensiv und möglicherweise krebserregend	Korkfußboden
Styrol	geruchsintensiv, neurotoxisch	Polystyrolharze, Klebstoffe
Ester	z. T. angenehmer, fruchtiger Geruch	Lösemittel in Lacken und Klebstoffen
Ketone	neurotoxisch, augenreizend	Lösemittel in Lacken

Hexabromcyclododecan

Hexabromcyclododecan (HBCD) ist ein ringförmiges, bromiertes Kohlenwasserstoffmolekül und zählt zu der Gruppe der persistenten organischen Schadstoffe (POP). HBCD liegt bei normaler Temperatur in festen Zustand vor und ist wenig wasserlöslich. Angewandt wird HBCD als Flammschutzmittel in expandierten und extrudierten Polystyrolschaum, die in der Bauindustrie als Isoliermaterial (Styropor) dienen (Koch-Jugl 2015).

Seit März 2016 besteht in Europa ein Herstellungsverbot von HBCD-haltige Produkten mit einem Gehalt von mehr als 100 mg/kg. Für die bis dato hergestellten Materialien bestand bis Juni 2016 eine Übergangsregelung, welche den verkauft und Einbau der Produkte gestattete. Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) mit HBCD dürfen weiterhin in der EU hergestellt und in Gebäuden verwendet werden, wenn der Hersteller über eine Zulassung der Europäischen Chemikalienverordnung verfügt. In Deutschland ist Polystyrol, umgangssprachlich auch Styropor, die am häufigsten eingesetzte Wärmedämmung. Die Verschärfung der Grenzwert auf 1.000 mg/kg HBCD und die Einstufung als gefährliches Dämmmaterial welches entsprechend entsorgt werden muss, stellte den Bausektor und insbesondere die Entsorgungsunternehmer, vor neue Herausforderungen. (Tashina 2017)

Am 01.08.2017 trat die neue Verordnung zur Überwachung von nicht gefährlichen Abfällen mit persistenten organischen Schadstoffen (POP-Abfall-ÜberwV) in Kraft, nach dem HBCD-haltige Abfälle im Regelfall weiterhin als nicht gefährlicher Abfall (HBCD-gehalt geringer als 1000 mg/kg) einzustufen sind (Kropp 2018).

5.2.3 Schwermetalle

Schwermetalle und Halbmetalle sind in sämtlichen Bausubstanzen und Einbauten allgegenwertig und abhängig von der Konzentration für den Menschen schädlich. Schwermetalle und Halbmetalle sind natürlich in Gesteinen der oberen Erdkruste vorhanden, wobei nicht alle als potentielle Schadstoffquelle in Innenräumen zu betrachten sind (Berg und Zwiener 2014). In Tabelle 15 Potenzielle Schadstoffquellen für Schwer- und Halbmetalle in Gebäuden, nach (Berg und Zwiener 2014) sind die für den Baubereich hauptsächlich relevanten Metalle dargestellt.

Tabelle 15 Potenzielle Schadstoffquellen für Schwer- und Halbmetalle in Gebäuden, nach (Berg und Zwiener 2014)

	Eigenschaften	**Vorkommen (beispielhaft)**
Antimon	Halbmetall, Dichte: 6,697 g/cm³	Pigmente, Farben, Stabilisatoren in Kunststoffen
Arsen	Halbmetall Dichte: 5,73 g/cm³ (grau) 1,97 g/cm³ (gelb) 4,7–5,1 g/cm³ (schwarz)	Holzschutz, Farbpigmente, Metalllegierungen
Blei	Schwermetall Dichte: 11,342 g/cm³	Farbpigmente, Bleirohre, Lacke, Rostschutzfarben, Kabelummantelungen, Dachdeckungen
Cadmium	Schwermetall Dichte: 8,65 g/cm³	Pigmente für Kunststoffe, Weichmacher, Legierungen
Chrom	Schwermetall Dichte: 7,14 g/cm³	Farbpigmente, Korrosionsschutz, Pigmente in Tapeten
Cobalt	Schwermetall Dichte: 8,90 g/cm³	Legierungen, Pigmente für Glas und Glasuren
Kupfer	Schwermetall Dichte: 8,92 g/cm³	Holzschutzmittel, Farbpigmente, Dachdeckungen, Wasserleitungen
Quecksilber	Schwermetall Dichte: 13,5459 g/cm³	Thermometer, Lampen, Farben
Thallium	Schwermetall Dichte: 11,85 g/cm³	Mäuse- und Rattengifte, Thermometer
Zink	Schwermetall Dichte: 7,14 g/cm³	Flammschutzmittel, Grundierungen und Spachtelmassen, Anstriche, Lüftungskanäle
Zinn	Schwermetall Dichte: 7,265 g/cm³	Holzschutzmittel

Nachfolgend werden die Metalle Blei und Quecksilber genauer dargestellt. Das Schwermetall Blei ist analog zu den anderen Metallen geogen in unserer Natur vorhanden. In Gebäuden entstehen potentielle Schadstoffquellen durch den Einsatz von Bleirohre, Bleche, Kabelummantelungen, Stabilisatoren in PVC, Rostanstrichen, etc. In einwandfreier Qualität geht von diesen Produkten keine Gefährdung aus. Die Gefährdung für Mensch und Natur entsteht beispielsweise durch Abrieb bleihaltiger Produkte oder vorhandener bleihaltiger Stäube in Innenräumen. Aufgrund der schädlichen Wirkung wurde Blei in der TRGS 905 (Technische Regeln für Gefahrstoffe - Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe) aufgenommen und als fruchtbarkeitsgefährden und fruchtschädigend eingestuft (Berg und Zwiener 2014). Ferner ist nachgewiesen, dass Blei und Bleiverbindungen potenziell krebserzeugend, reproduktionstoxisch, bioakkumulierend sowie umweltgefährdend sind (Bossemeyer et al. 2016). Die Aufnahme von Blei erfolgt in erster Linie oral durch die Belastung von Trinkwasser oder inhalativ, was jedoch seltener der Fall ist.

Quecksilber ist ein bei Zimmertemperatur flüssig vorliegendes Metall. Generell kann metallisches Quecksilber für die Füllung von Thermometern, Batterieherstellung, Leuchtstoff- und Energiesparlampen, Holzschutzmittel verwendet werden (Berg und Zwiener 2014). In Gebäuden können aktuell noch quecksilberhaltige Leuchtstoff- und Energiesparlampen vorhanden sein. Seit 2009 besteht ein Herstellungs- und Vertriebsverbot von entsprechenden Lampen. Ein generelles Verbot von Quecksilber besteht nicht.

Gefährdungspotential für den Menschen besteht ist im Wesentlichen darin, dass organische Quecksilber über den Magen-Darm-Trakt sowie über die Haut und Lunge aufgenommen werden kann. Quecksilber kann das zentrale Nervensystem (z.B. beim Einatmen von Quecksilberdämpfen) angreifen und bei Schwangeren die Entwicklung des Gehirns des ungeborenen Kindes massiv schädigen. Durch defekte Geräte und einen damit verbundener Austritt Quecksilbers kann es zu einer Quecksilberbelastung in Gebäuden kommen. Quecksilberbelastungen in Gebäuden kommen erfreulicherweise selten vor. (Umweltbundesamt 2013, 2016a)

5.2.4 Biologische Schadstoffe

Schimmelpilze

Unter dem Begriff Schimmel werden äußere Erscheinungen bezeichnet, die sich auf Oberflächen, Materialien oder auch Lebensmittel bilden und eine Gesundheitsschädigung verursachen. Die Bildung von Schimmel ist auf die Anwesenheit einer Vielzahl von Pilzen und auch Bakterien zurückzuführen. Voraussetzungen für das Heranwachsen von Schimmelpilzen sind das Vorhandensein von mindestens einer Spore bzw. eines vitalen Hyphenstückes, sowie ein feuchtes Milieu und ein geeigneter Nährboden. Letzteres kann beispielsweise Zellulose sein, weswegen innerhalb von Gebäuden oftmals Tapeten, Kleister, Spanlatten oder Gipskartonplatten befallen sind. Sporen sind ein natürlicher Bestandteil der Außenraumluft und können über die Luft in Innenräume getragen. Als potentielle Schadstoffquellen in Innenräume sind nach (Berg und Zwiener 2014) beispielsweise folgende zu nenne:

- feuchte Schuhe,
- unzureichende Lüftung,
- Blumenerde,
- Lederware,
- Feuchteschaden bzw.
- Baumängel (schlechtes Wärmedämmverbundsystem).

Ein Schimmelpilzbefall kann mit großen Feuchteansammlungen und schwarzen Schattierungen der angegriffenen Position einhergehen. Es kann auch zu einem nicht sichtbaren Befall der Trittschalldämmung oder Trockenbaukonstruktionen kommen. Je nach Exposition können Gesundheitsrisiken für den Menschen bestehen. Gesundheitliche Auswirkungen für den Menschen sind beispielsweise chronische Nasennebenhöhlenentzündung, Hautproblemen, Bronchitis und Gelenkschmerzen (Lorenz und Betz 2016).

Vogelkot

Der beispielsweise durch Tauben hinterlassene Kot kann potenziell eine gesundheitliche Gefahr für den Menschen darstellen aber andererseits auch, wie alle biologischen Schadstoffe, zu erhebliche Schäden an Bauwerken führen. In dem ausgeschiedenen Taubenkot sind zahlreiche Mikroorganismen wie zum Beispiel Bakterien, Hefen und Pilze sowie Viren vorhanden, wobei die Bakterien hinsichtlich der Gesundheitsrisiken für den Menschen deutlich hervorzuheben sind. Bei Kontakt mit dem Menschen kann es zu Infektionen kommen, die sich durch Durchfälle, Übelkeit, Kreislaufschwäche, Fieber etc. auszeichnen. Grundsätzlich gilt analog zur Schimmelpilzsanierung, dass bei einem Befall innerhalb von Gebäuden der Schadensausmaß ermittelt und geeignete Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen sind. (Berg und Zwiener 2014)

5.3 Sonderfall Brandschaden

Im Falle eines Brandereignisses im Gebäude können massive Schäden an der Tragkonstruktion entstehen aber auch Schadstoffe eingebracht werden. Neben den beim Löschen eingesetzten Stoffen können auch im Zuge des Brandereignisses Schadstoffe eingetragen werden. Abhängig von am Brand beteiligten Materialien können neue Schadstoffe überwiegend in gasförmiger Form entstehen. Dies hat zur Folge, dass die Schadstoffe während des Brandes mobil sind und sich rasch ausbreiten. (LfU 2011) Während eines Brandereignisses können sich nach (envilex 2014) folgende potenziell gefährliche Gase bilden:

- Kohlendioxid (CO_2),
- Kohlenmonoxid (CO),
- Stickoxide (NO_x),
- Schwefeldioxid (SO_2),
- Schwefelwasserstoff (H_2S),
- Chlor (Cl_2),
- Salzsäure (HCl),
- Bromwasserstoff (HBr) und etc.

Durch die in der Bausubstanz oder technischen Gebäudeausrüstung verbauten Schadstoffe, wie beispielsweise PCB, aber auch je nach verbranntem Material (Holz, Kunststoffe, etc.), können während des Brandes potenziell weitere giftige Gase oder Dämpfe entstehen. Hier sind beispielsweise im Ruß enthaltene PAK, Halogenverbindungen oder auch organische Schadstoffe wie Dioxine und Furane zu nennen. (Berg und Zwiener 2014)

5.4 Zuordnung von Schadstoffen in Baualtersklassen der Wohngebäude nach IWU

In dem nachfolgenden Kapiteln werden die vorgestellten Gebäudeschadstoffe den Bauepochen nach IWU für Wohngebäude zugeordnet. Dabei werden die Schadstoffgruppen betont, die am häufigsten verbaut und heute ggf. noch anzutreffen sind. Basierend auf den Zeitpunkt von Verwendungsverbote und Einschränkungen einiger Gebäudeschadstoffe werden die Baualtersklassen A bis H gemäß IWU betrachtet, und mit den Hauptverwendungszeiträumen der Schadstoffe überlagert. Für die Baualtersklassen I bis K (1995 – ab 2010) wird aktuell angenommen, dass keine Belastung mit potenziell gefährlichen Schadstoffen vorliegt. Ob eine Substanz ein potentieller Schadstoff ist, zeigt sich in der Regel erst zeitversetzt.

Baualtersklasse A

Die Baualtersklasse A enthält die Betrachtung der Gebäude bis 1859. Diese Bauepoche war geprägt durch die Verwendung lokal verfügbarer Baumaterialien. Die Gebäude dieser Baualtersklasse wurden meist in Form von Fachwerkhäusern errichtet. In Tabelle 16 sind die potenziell vorkommenden Schadstoffe der Baualtersklasse A unterteilt nach Bauteilen dargestellt.

Tabelle 16 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse A (bis 1859), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015)

Bauteil	Schadstoff
Außenwände	• Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • PAK in Teeröl (hier: Einsatz ebenfalls als Holzschutzmittel) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Innenwände	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel)
Decken	• Schlackefüllungen (meist PAK-haltig) • PAK in Pappen
Fenster, Türen	• PCB • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen

Aufgrund der einfachen Bauweise und den überschaubaren Baumaterialien ist die Anzahl der Schadstoffe begrenzt. Dämmmaterialien wurden zu dieser Zeit noch nicht verwendet, darum begrenzt sich das Schadstoffpotential in erster Linie auf die Holzkonstruktionen. Speziell das Tragwerk, sowie Balkendecken, Fußböden, Fenster oder auch Türen aus Holz sind größtenteils behandelt worden. Je nach Region wurden die Dächer mit unterschiedlichen Materialien (Schiefer, Ziegel, etc.) eingedeckt, sodass sich regional auch die ersten Asbest-Schindeln vorhanden sein können.

Baualtersklasse B

Die Baualtersklasse B betrachtet die Gebäude der Jahre 1860 bis 1918. Diese Bauepoche entspricht der Gründerzeit und ist durch die beginnende Industrialisierung geprägt. Aufgrund dessen der Bedarf an Wohnraum insbesondere in städtischen Gebieten an stieg. In Tabelle 17 sind die potenziell vorkommenden Schadstoffe der Baualtersklasse B unterteilt nach Bauteilen dargestellt.

Tabelle 17 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse B (1860-1918), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• PAK (z. T. als Teeranstrich erdberührter Bauteile) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Innenwände	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel) • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • PAK (z. B. Dachbahnen)
Decken	• Schlackefüllungen (meist PAK-haltig) • PAK in Pappen
Fenster, Türen	• PCB • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Formaldehyd (z. B. in Fertigparkett)

Holzschutzmittel ist in der Baualtersklasse B auch vorhanden, aber die Außenwände wurden vermehrt aus Mauerwerk hergestellt so dass sich die Masse etwas verringerte. Erstmalig kommen formaldehydhaltige Stoffe bei beispielsweise Fertigparkett sowie PAK-haltige Dachbahnen zur Anwendung.

Baualtersklasse C

Die Baualtersklasse C umfasst den Zeitraum von 1919 bis 1948. Die noch in Baualtersklasse B allgegenwärtigen verzierten Stuckfassaden wurden ersetzt durch Putz- oder Ziegelfassaden. Flachdächer wurden vermehrt gebaut. Die Dächer waren zu dieser Zeit ungedämmt. Bei den Tragkonstruktionen aus Mauerwerken kommen Materialien wie Voll- oder Lochziegeln bzw. Bimssteinen zu Einsatz. Bei Deckenkonstruktionen ist Holz immer noch Bestandteil dieser Stilrichtung. (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) In Tabelle 18 sind die potenziell vorkommenden Schadstoffe der Baualtersklasse C unterteilt nach Bauteilen dargestellt.

Tabelle 18 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse C (1919-1948), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• PAK (z. T. als Teeranstrich erdberührter Bauteile) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Asbest (z.B. Fassadenplatten)
Innenwände	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel und Wellplatten) • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • PAK (z. B. Dachbahnen)
Decken	• Schlackefüllungen (meist PAK-haltig) • PAK in Pappen oder Anstriche • KMF (z.B. unter Holzdecken)
Fenster, Türen	• PCB (z.B. in Dichtungen) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • PAK (z. B. in Fertigparkett)
Haustechnik	• Asbest (z.B. Rohrummantelung)

Baualtersklasse D

Die Zeit nach dem zweiten Weltkrieg war speziell in Großstädte durch den Wiederaufbau geprägt. Ziel war es preiswerte Wohnungen in großer Stückzahl in kürzester Zeit herzustellen. Baualtersklasse D (1949 bis 1957) ist geprägt von einfachen Bauweisen und die Verwendung von Trümmer-Materialien, bedingt durch vorherrschender Materialknappheit. Im Vergleich zu den vorherigen Baualtersklassen kommen demnach Materialien zum Einsatz, die ein höheres Schadstoffpotential aufweisen. Zusätzlich beginnt die Hauptverwendungszeit von Asbest.

In Tabelle 19 sind die potenziell vorkommenden Schadstoffe der Baualtersklasse D unterteilt nach Bauteilen dargestellt.

Tabelle 19 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse D (1949-1957), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• PAK (z. T. als Teeranstrich erdberührter Bauteile) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Asbest (z.B. Fassadenplatten) • PCB (z.B. Dichtungen)
Innenwände	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel und Wellplatten) • PAC (z.B. Dachbahnen) • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF
Decken	• Asbesthaltige Steinholzestriche • PAK (Teerasphaltestrich) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF • Formaldehyd
Fenster, Türen	• PCB (z.B. in Dichtungen) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Asbest in Brandschutztüren • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • PAK (z. B. Kleber) • Asbest (z.B Floor-Flex-Fliesen)
Haustechnik	• Asbest (z.B. Rohrummantelung, Elektrospeicherheizgeräte, Lüftungskanäle) • KMF (z.B. Isoliermaterial)

Baualtersklasse E

Die Baualtersklasse E bezieht sich auf die Jahre 1958 – 1968. In dieser Zeit werden die ersten Hochhaussiedlungen gebaut. Aus diesem Grund werden massive Bauweisen aus Stahlbeton bevorzugt. Der konstruktive Wärmeschutz ist nicht Stand der Technik wird aber vermehrt verbaut. Ab den 60er Jahren wird für den Innenwandaufbau die Trockenbautechnik angewendet. Aus diesem Grund ist eine typische Schadstoffgruppe der Künstlichen Mineralfasern und Formaldehyd als Holzschutzmittel. Beim Einsatz von Zementplatten für die Trockenbauwände ist mit einer potenziellen Asbestbelastung zu rechnen. Aus diesen Gründen erhöht sich das innerhalb von Wohngebäuden potentielle Schadstoffpotential wie folgt (vgl. Tabelle 20):

Tabelle 20 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse E (1958-1968), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• PAK (z. T. als Teeranstrich erdberührter Bauteile) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • formaldehydhaltige Spanplatten • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF (Dämmmaterial) • Asbest (z.B. Fassadenplatten) • PCB (z.B. Dichtungen)
Innenwände	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • formaldehydhaltige Spanplatten • Asbest (Putze und Spachtelmassen)
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel und Wellplatten) • PAC (z.B. Dachbahnen) • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF
Balkone	• Asbestzementverkleidungen • PAK-haltige Abdichtungen
Decken	• Asbesthaltige Steinholzestriche • formaldehydhaltige Spanplatten • PAK (Teerasphaltestrich) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF
Fenster, Türen	• PCB (z.B. in Dichtungen) • lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • Asbest in Brandschutztüren • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • PAK (z. B. Kleber) • Asbest (z.B. Floor-Flex-Fliesen) • PCB • formaldehydhaltige Holzwerkstoffplatten
Haustechnik	• Asbest (z.B. Rohrummantelung, Elektrospeicherheizgeräte, Lüftungskanäle) • KMF (z.B. Isoliermaterial) • Schwermetalle (z.B. Wasserleitungen) • PCB (z.B. Leuchtstofflampen)

Baualtersklasse F

Die Baualtersklasse F bezieht sich auf den Zeitraum von 1969 bis 1978. Fertighäuser in Holzrahmenbauweise (bzw. auch mit Fertigteilen) werden gebaut, was einen Anstieg von formaldehydhaltigen Harzen zur Verleimung von Holzplatten zu Folge hatte. Das Bauzeitalter ist durch eine Vielzahl an architektonischen Varianten geprägt. Beispielsweise variierten die Fassendenbekleidungen von Kleinteiligen- bis großförmigen Fassadenbekleidungen über Attika- und Sockelverkleidungen bis hin zu Waschbetonfassaden. Die Fassaden wurden sowohl gedämmt (hauptsächlich KMF oder Polystyrol) als auch ungedämmt ausgeführt. Die Verbreitung von Flachdächern nimmt zu und der Wärmeschutz gewinnt an Bedeutung. In den vorherigen Baualtersklassen wurden Fenster i.d.R. ohne KMF-haltige Füllung bzw. Fensterlaibung eingebaut. Dies änderte sich ab der Baualtersklasse F, wodurch eine zusätzlich potenzielle Schadstoffquelle entsteht. Beim Innenausbau werden Deckenplatten eingebaut, die beidseitig aus einem offenporigen Anstrich und einem KMF-Kern bestehen was eine flächenhafte Schadstoffquelle darstellt. In Tabelle 21Tabelle 19 sind die potenziell vorkommenden Schadstoffe der Baualtersklasse F unterteilt nach Bauteile dargestellt.

Tabelle 21 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse F (1969-1978), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• PAK (z. T. als Teeranstrich erdberührter Bauteile) • formaldehydhaltige Holzwerkstoffe • Asbest (z.B. Fassadenplatten) • PCB (z.B. Dichtungen) • KMF (Dämmmaterial) • HBCD (Dämmmaterial)
Innenwände	• formaldehydhaltige Spanplatten • Asbest (Putze und Spachtelmassen) • KMF (Dämmmaterial)
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel und Wellplatten) • PAC (z.B. Dachbahnen) • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT) • KMF
Balkone	• Asbestzementverkleidungen • PAK-haltige Abdichtungen
Decken	• Asbesthaltige Steinholzestriche • formaldehydhaltige Spanplatten • PAK (Teerasphaltestrich) • KMF • HBCD (z.B. Abhangdecken)
Fenster, Türen	• PCB (z.B. in Dichtungen) • KMF • Asbest in Brandschutztüren • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittel- und schwermetallhaltige Beschichtungen • PAK (z. B. Kleber) • Asbest (z.B. Floor-Flex-Fliesen) • PCB • formaldehydhaltige Holzwerkstoffplatten
Haustechnik	• Asbest (z.B. Rohrummantelung, Elektrospeicherheizgeräte, Lüftungskanäle) • KMF (z.B. Isoliermaterial) • Schwermetalle (z.B. Wasserleitungen) • PCB (z.B. Leuchtstofflampen)

Baualtersklasse G

Die Baualtersklasse G (1979 – 1983) ist geprägt durch die 1977 erste eingeführt Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV). Als Stand der Technik etablierte sich das Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Es entsteht ein Bewusstsein für schadstoffarmes Bauen. (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) Der Hauptanwendungszeitraum von asbesthaltigen Baumaterialien entspricht den Baualtersklassen D bis F aber es wird weiterhin Asbest verbaut. Beispielsweise in bauchemischen Asbestprodukten wie Spachtelmassen, Kleber und Beschichtungen (Bossemeyer et al. 2016). Demzufolge muss bei Gebäuden, die in der Baualtersklasse G errichtet wurden, immer noch mit folgenden Schadstoffen gerechnet werden (vgl. Tabelle):

Tabelle 22 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse F (1979-1983), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007)

Bauteil	Schadstoff
Außenwand	• formaldehydhaltige Holzwerkstoffe • Asbest (z.B. Fassadenplatten) • PCB (z.B. Dichtungen) • KMF (Dämmmaterial) • HBCD (Dämmmaterial)
Innenwände	• formaldehydhaltige Spanplatten • Asbest • KMF (Dämmmaterial) • lösemittelhaltige Beschichtungen
Dächer	• Asbest (z. B. in Schindel und Wellplatten) • PAC (z.B. Dachbahnen) • formaldehydhaltige Holzwerkstoffe • KMF
Decken	• formaldehydhaltige Holzwerkstoffe • KMF • HBCD (z.B. Abhangdecken)
Fenster, Türen	• PCB (z.B. in Dichtungen) • KMF • Asbest in Brandschutztüren • Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT)
Böden, Teppiche	• lösemittelhaltige Beschichtungen • Asbest • formaldehydhaltige Holzwerkstoffplatten
Haustechnik	• Asbest • KMF • Schwermetalle • PCB

Baualtersklasse H

In der Zeit der Baualtersklasse H (1984 – 1994) trat die zweite (1984) WärmeschutzV in Kraft. Aufgrund der verschärften Anforderungen der Wärmeschutzverordnung werden breitere Querschnitter bei den Außenwandkonstruktionen gebaut. Ab den 1990er Jahren entstehen die ersten Niedrigenergiehäuser, die mit erhöhter Wärmedämmung des Daches und der Außenwände sowie eine Isolierung der Fenster und der Außentüren gebaut werden. (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) Die Anwendungsverbote von PCB (1989) und Asbest (1996) treten in Kraft. 1996 wird die Produktion der „Alten Mineralwolle eingestellt und das Verwendungsverbot greift ab dem Jahr 2000. (Bossemeyer et al. 2016) Der Einsatz von PCB-haltigen Baumaterialien nimmt ab aufgrund der Einstellung der Produktion in Deutschland ab 1983. Demnach hat sich die Anzahl der potenziellen Schadstoffbelastungen deutlich verringert. Dennoch können Belastungen mit Asbest, KMF, HBCD, Holzschutzmitteln, PCB und PAK nicht ausgeschlossen werden.

5.5 Gewichtung der Gebäudeschadstoffe

In Nordrhein-Westfahlen sind beispielsweise ca. die Hälfte des heutigen Wohnungsbestandes aus den Jahren 1950 bis ca. 1975 (Zwiener 2007). Überlagert mit den Baualtersklassen der IWU, besteht der Wohngebäudebestand hauptsächlich aus den Baualtersklassen D bis F. Diese Bauepochen sind anfangs geprägt durch den Wiederaufbau der Nachkriegszeit und dem ansteigenden Wohnflächenbedarf insbesondere in städtischen Gebieten. Dementsprechend hoch war der Bedarf an Stoffen und Materialein um schnell und kostengünstig bauen zu können. So ist heute bekannt, dass im Verlauf dieser Bauepochen einige Gebäudeschadstoffe angewandt und verbaut wurden. Zu der Zeit überwiegen die für den Baubereich vorteilhaften Eigenschaften der Stoffe wie hitzebeständig, säureresistent oder hydrophobes Verhalten. Das Wissen über die potenziell Gesundheitsschädigenden Wirkungen dieser Stoffe für Menschen war noch nicht allumfänglich bekannt.

Abbildung 13 zeigt die Hauptanwendungszeiträume der Schadstoffe Asbest, KMF, Holzschutzmittel (PCP, Lindan und DDT), PCB, PAK und Formaldehyd in Anhängigkeit der Baualtersklassen gemäß IWU. Die Hauptanwendungszeiträume sowie die Gewichtsverteilung basiert auf der vorangestellten Literaturrecherche. Die Spannweite der Gewichtung reicht von den Ziffern 0 (kein Vorkommen) bis Ziffer 10 (sehr starkes Vorkommen) entsprechend den zehn Bauepochen nach (Loga et al. 2015). Basierend auf der Gewichtung je Schadstoff wird die potenzielle Belastung von Bestandsgebäuden (s. Kapitel 7.3.3) analysiert. Die Tabelle mit den Gewichtungen der Gebäudeschadstoffe ist im Anhang B (S. 118) abgebildet.

Es wird deutlich, dass die Stoffe Asbest, Holzschutzmittel, PCB und Formaldehyd in den Baualtersklassen D bis F dominieren und in der breiten Masse im Bauwesen eingesetzt wurden. Die Verwendung dieser Stoffe fand grundsätzlich schon weitaus früher statt. Die Verwendung der Stoffe in den Baualtersklassen A und I kann über die eingebauten Materialien abgeschätzt werden. Zu berücksichtigen ist, dass der Einsatz der unterschiedlichen Schadstoffgruppen sehr vielfältig ist und die Anwesenheit potenzieller Schadstoffe hier ausschließlich über die Bauzeitalter gewichtet wird. Der Zeitpunkt des in Kraft treten von Verboten der Stoffe wird als Grundlage herangezogen um die Anwesenheit bestimmter Schadstoffe auszuschließen. Ob in einem konkreten Objekt Schadstoffbelastungen vorhanden sind ist immer im Einzelfall zu prüfen.

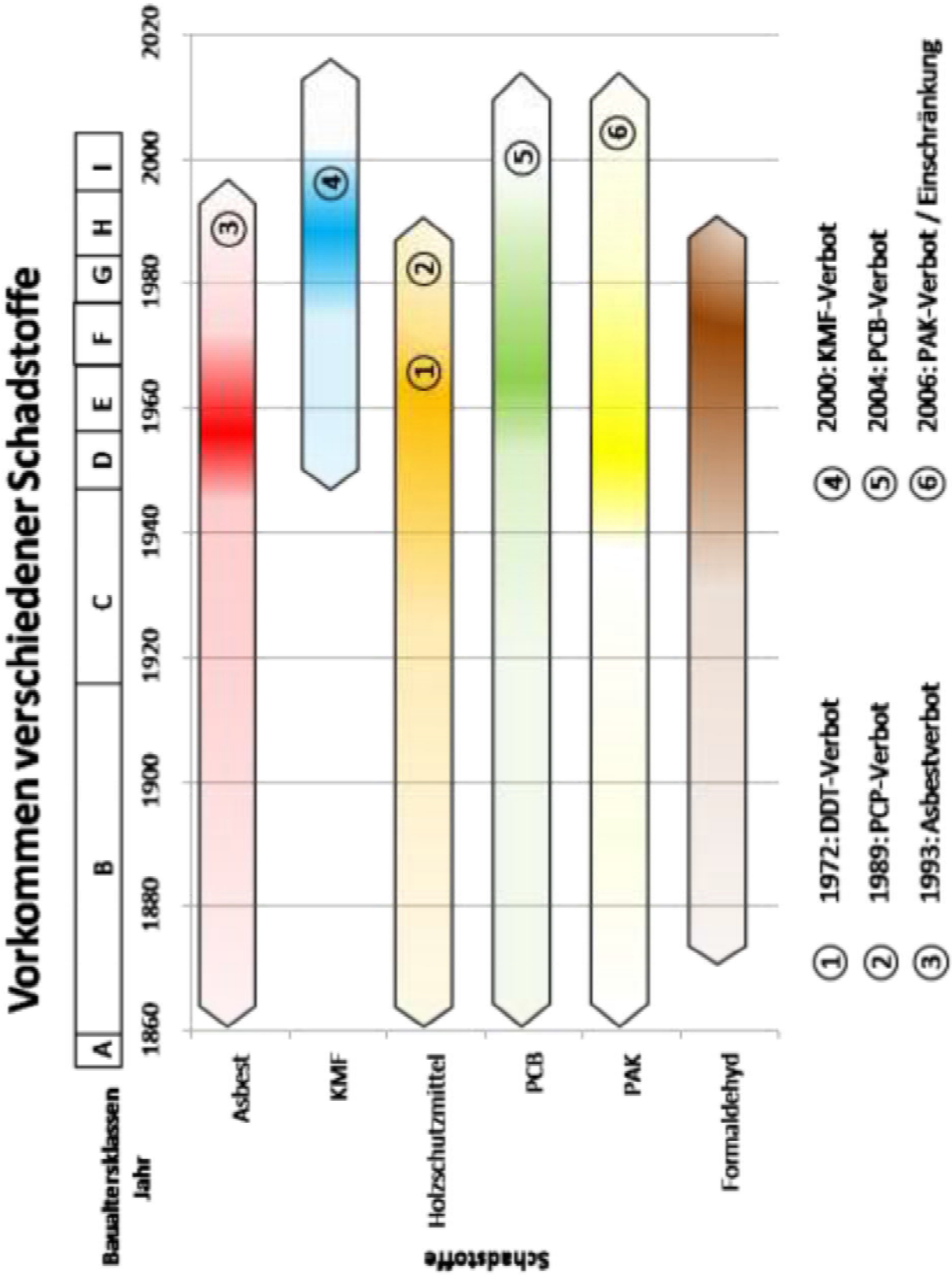


Abbildung 13 Vorkommen ausgewählter Schadstoffe im Bauwesen in Abhängigkeiten der Baualtersklassen nach IWU (Funke 2018)

6 ANALYSE DER RECYCLINGPOTENZIALE AUF PRODUKT – UND GEBÄUDEEBENE

6.1 Allgemeines

Es konnte gezeigt werden, dass die Massenermittlung im Rahmen einer Gebäudeökobilanzierung ein geeignetes Instrument ist um die im Gebäude verbauten Materialien zu identifizieren und zu quantifizieren (vergl. Kapitel 4.4). Im folgenden Kapitel wird analysiert ob ausgewählte Indikatoren der Gebäudeökobilanz geeignet sind um die Potenziale der im Gebäude verbauten Materialien abzubilden.

Dazu wird das Informationsmodule D der Ökobilanzierung betrachtet. Zunächst wird das Modul definiert und in seiner Bedeutung zu den anderen Modulen der Ökobilanz abgegrenzt. Der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich Modul D wird wiedergegeben. Als Datengrundlage wird die Ökobaudat 2016 (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)) und alle darin enthalten Umweltproduktdeklarationen (EPD) herangezogen. Die in den EPDs angenommen Szenarien für Modul D werden analysiert. Die Szenarien werden auf Produktebene und auf Gebäudeebene betrachtet. Zur Durchführung der Potenzialanalyse werden die Indikatoren Treibhauspotenzial (THG) und Primärenergie (erneuerbar (PERE), nicht erneuerbar (PENRE)) herangezogen.

Auf Gebäudeebene sind Holzgebäude (Massivholz, Holztafelbau) und mineralische Gebäude (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton und Stahlbeton) vertreten. Die nachfolgenden Analysen beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude. Diese wurden im Kapitel 4.4 vorgestellt. Ziel ist es zu untersuchen ob Modul D eine geeignete Informationsquelle ist, um potenziell für das Recycling zu Verfügung stehendes Material abzubilden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ – Wissenschaftliche Begleitung der Arbeitsgruppe „Modul D“ des Rundes Tisches Nachhaltigen Bauens“ (Lützkendorf et al. 2017) wurde Modul D im Verhältnis zu den anderen Modulen der Lebenszyklusabschnitte betrachtete. „Ziel des Forschungsvorhabens ist es einen konsensfähigen Weg für eine Berücksichtigung des Themenkomplexes End-of-Life im BNB-System aufzuzeigen. Hierdurch soll ein Beitrag geleistet werden, die Diskussion um End-of-Life Prozesse zu versachlichen und die Motivation der Bauproduktthersteller zu erhöhen, Daten produktspezifisch und vor allem vollständig bereitzustellen.“ (Lützkendorf et al. 2017) Dafür wurden im Rahmen des Projektes „[..] ökobilanzielle Variantenrechnungen für ein repräsentatives Büro- und Verwaltungsgebäude durchgeführt“ (Lützkendorf et al. 2017). Die Ergebnisse wurden für gängigen Indikatoren der Gebäudeökobilanz dargestellt und im Hinblick auf den Anteil von Modul D an den Gesamt Umweltwirkungen analysiert. „Die Untersuchungen des Recyclingpotenzials haben gezeigt, dass zum aktuellen Zeitpunkt ein großes Potenzial zur transparenten Darstellung des ökobilanziellen Modul D besteht, […]“ und „die Annahme, dass Modul D in annähernd allen Wirkungskategorien einen im Schnitt geringeren prozentualen Anteil einnimmt […]“ (Lützkendorf et al. 2017). Kritisch angemerkt wurde, dass ein nicht zu ignorierender Anteil der verwendeten Datensätze zu Bauprodukten kein Modul D enthielt. (Lützkendorf et al. 2017) Die Aussagekraft des Recyclingpotenzials in Modul D wird im Folgenden detailliert analysiert.

6.2 Rahmenbedingungen der Gebäudeökobilanz; Lebenszyklusabschnitte und Datengrundlage

Nach EN 15804:2012 (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) werden die Lebenszyklusabschnitte eines Produktes in Informationsmodulgruppen A bis D unterteilt, um für eine Bilanzierung auf Gebäudeebene vereinheitlichte Informationen bereitstellen zu können. Die Definition der aus einer Kombination aus Buchstaben und Ziffern bestehenden Bezeichnung der Informationsmodule ist in Abbildung 14 dargestellt.

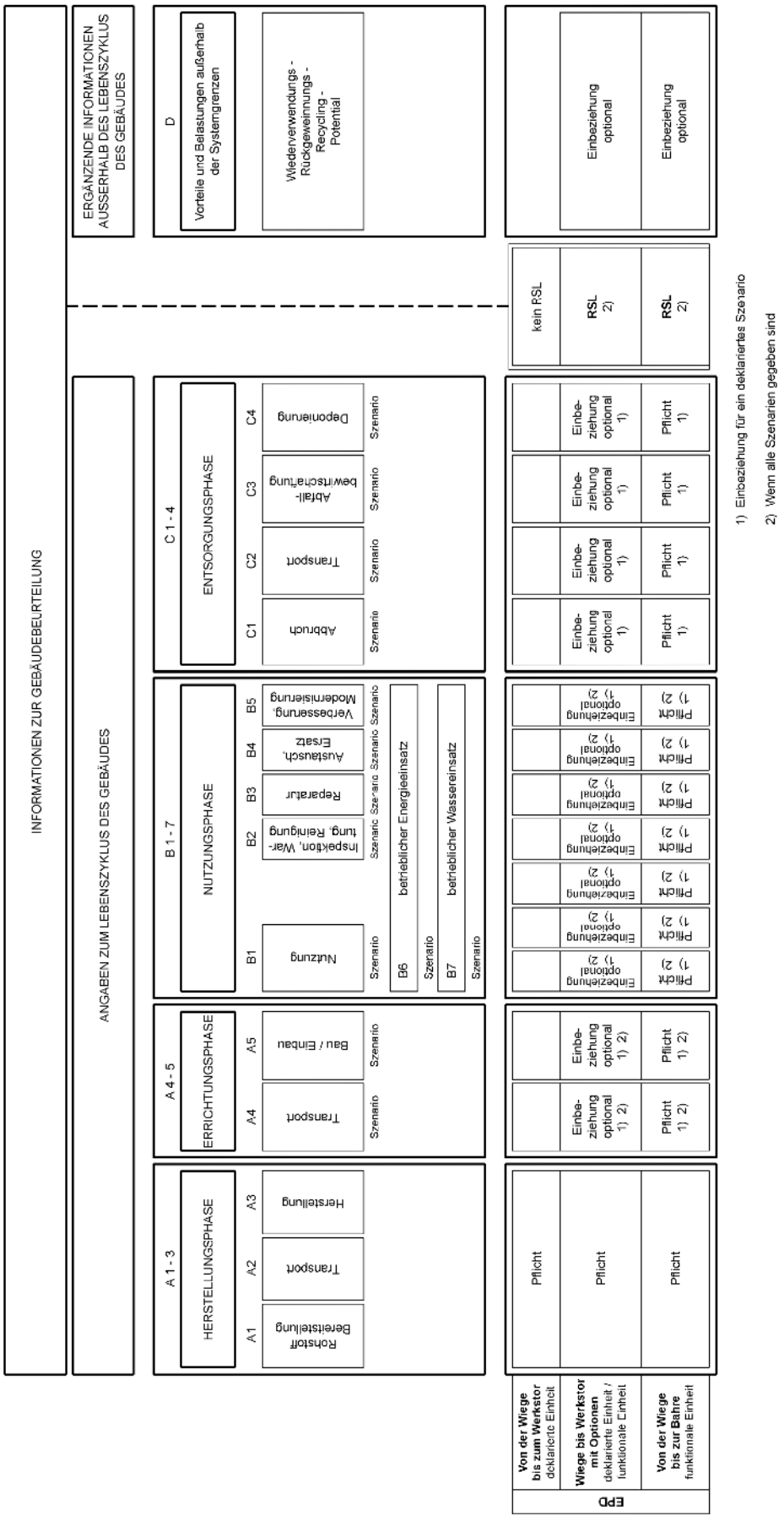


Abbildung 14 Übersicht der Lebenszyklusabschnitte und den zugehörigen Unterteilungen, geändert nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014)

Der Modulblock A, bestehend aus den Modulen A1 bis A5, bezieht sich auf die Produktion der Baustoffe (A1 bis A3) und auf die Errichtung des Gebäudes (A4 bis A5). Der Modulblock B mit den Informationsmodulen B1 bis B7 thematisiert die verschiedenen Aspekte der Nutzung des Gebäudes mit Berücksichtigung der benötigten Energie und dem Wasser für die Technischen Gebäudeausstattung (TGA) sowie Aufwendungen für die Instandhaltung und Reparatur der Bauteile. Am Ende des Lebenszyklus wird das Gebäude abgerissen und die anfallenden Baustoffe werden entsorgt bzw. recycelt. Dies wird in den Informationsmodulen zur Entsorgung C1 bis C4 thematisiert. Alle möglichen Last- und Gutschriften über den Lebensweg des Produktsystems hinaus, welche bei der Wiederverwendung oder dem Recycling des Produktes, wie auch bei der Rückgewinnung von Rohstoffen entstehen können, werden in Modul D bilanziert.

Die Norm unterscheidet zudem drei mögliche Typen der Ausgestaltung von EPDs, je nachdem welche Module von Produkten bei der Bilanzierung erfasst werden. Sollen die Aufwendungen nur für das Produktionsstadium, also von der Bereitstellung der Rohstoffe bis zum Werkstor der Produktion abgebildet werden, reichen Angaben zu den Lebenszyklusabschnitten der betroffenen Module A1 bis A3 (cradle to gate). Als zweite Möglichkeit können über das Produktionsstadium hinaus optional weitere Lebenszyklusabschnitte angegeben werden. Produktökobilanzen, welche nach diesem Schema vorgehen, umfassen die Module A1 bis A3 sowie zum Beispiel die Module C2 bis C4 und D (cradle to gate with options). Als dritte Möglichkeit der Ausgestaltung nach Norm EN 15804:2012 beschreibt eine EPD den gesamten Lebenszyklus des Produktes die dementsprechend alle Informationen der Abschnitte A1 bis C4 enthält (cradle to grave). Eine Ausnahme hiervon bildet das Informationsmodul D. Dies ist in keiner der drei Typen der Produktökobilanz eine verpflichtende Angabe, sondern immer eine optionale Information darstellt. (Rüter und Diederichs 2012)

Der Lebenszyklus einer Gebäudeökobilanz wird mit 50 Jahren berechnet. Die Recyclingprozesse der Produkte müssen dementsprechend über Annahmen und Szenarien berücksichtigt werden. Grundsätzlich wird angenommen, dass die Recyclingfähigkeit aller Materialien gegeben ist und diese entsprechend der geltenden Verwertungsvorschriften behandelt werden. Die Szenarien für C3 und C4 werden, wenn keine spezifischen Angaben vorliegen, einem entsprechenden Abfallschlüsseln des Kreislaufwirtschaftsgesetzes für die Produkte zugeordnet und mit generischen Datensätzen für die Prozesse berechnet. Die Entsorgungsregeln der Zertifizierungssysteme (DGNB/BNB) für die Zuordnung der Entsorgungsszenarien werden eingehalten und haben folgende Vorgaben:

In die Berechnung der Gebäudeökobilanz sind Entsorgungsszenarien für alle in der Herstellungsphase gelisteten Materialien/Baustoffe einzubeziehen. Die Szenarien für folgende Materialgruppen sind nach DGNB und BNB zu charakterisieren (BNB; DGNB):

- Metalle zur Verwertung
- Mineralische Baustoffe zur Verwertung (z.B. Beton)
- Materialien mit einem Heizwert zur thermischen Verwertung (z. B. Holz, Kunststoffe etc.)
- Materialien, die nur auf Deponien abgelagert werden (Glas, Mineralwolle, Gipskartonplatten, Bitumenpappen).

Die Hintergrunddaten zur Erstellung der Gebäudeökobilanz werden der Ökobaudat entnommen. Die Grunddaten weisen DIN EN 15804:2014 -konforme generische Datensätze (thinkstep) und EPD (Environmental Product Declaration) - Datensätze (unterteilt in repräsentative Datensätze von Industrieverbänden, durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden und Hersteller-spezifische Datensätze) auf.

Werden wie oben beschrieben keine Angaben zu den Modulen C und D bereitgestellt, werden diese Datensätze, entsprechend der beschriebenen Regelung, mit generischen Entsorgungsinformationen (generischer Datensatz) verknüpft. Dies ist notwendig um eine vollständige Ökobilanz brechen zu könne.

Module D

Nach DIN 15804:2012 wird Modul D definiert als Informationsmodul das Transparenz für die Umweltvorteile oder -belastungen schaffen soll, die durch wieder verwertbare Produkte, recycelte Stoffe und/oder nutzbare Energieträger, die das Produktsystem z. B. als Sekundärstoffe oder –Brennstoffe verlassen, verursacht werden.

Mit Modul D wird das Konzept des „Design für Wiederverwertung, Recycling, und Rückgewinnung“ (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) für Gebäude gewürdigt, indem die potenziellen Gutschriften für den zukünftig vermiedenen Einsatz von Primärstoffen und –Brennstoffen dargestellt werden, bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Lasten, die mit den Recycling- und Rückgewinnungsprozessen jenseits der Systemgrenze einhergehen. (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014)

Modul D ist ein Indikator der das Recyclingpotenzial eines Produktes abbildet. Wie bereits dargestellt werden alle möglichen Last- und Gutschriften über den Lebensweg des Produktsystems hinaus, welche bei der Wiederverwendung oder dem Recycling des Produktes, wie auch bei der Rückgewinnung von Rohstoffen entstehen können, in Modul D bilanziert. Das bedeutet Modul D wird von verschiedenen Modulen beeinflusst (vergl. Abbildung 15). Die Entsorgung der Verpackung, in der ein Produkt auf die Baustelle Transportiert wird, beschreibt Modul A5. Die aus dieser Entsorgung hervorgehende Gutschrift bzw. eine mögliche Verwertung werden in Modul D betrachtet. Modul C3 beinhaltet alle Aufwendungen für die Abfallbewirtschaftung nach Abriss des Gebäudes. Das Modul C4 beschreibt eine mögliche Deponierung der Produkte am Ende des Lebenszyklus. Die hierbei entstehenden Last- und Gutschriften werden ebenfalls in Modul D bilanziert. Wird Modul D auf Gebäudeeben betrachten kommen zusätzlich noch die Werte aus Modul B2 hinzu welche die für die Instandhaltung eingesetzten Produkte beinhaltet.

Im Folgenden werden die Werte Indikatoren Primärenergie (PERE/PENRE) und Treibhauspotenzial (THG) von Modul D zur Beurteilung des Recyclingpotenzials herangezogen.
Die Werte in Modul D sind in der Regel negativ. Wird in Modul A5 Verpackungsmaterial verbrannt oder die Produkte in C3/C4 einer thermischen Verwertung zugeführt wird in PERE/PENRE die vermiedene Primärenergienutzung zur Erzeugung der exportierten Energie als positiver Wert angeführt. Im Fall einer stofflichen Verwertung (rezykliert) wird der Wert für PERE/PENRE aus der Summe des Primärenergiebedarfs für den Recyclingprozess (positiver Wert) und der vermiedenen Primärenergie (negativer Wert) aufgrund der vermiedenen Neuproduktion in Modul D ausgewiesen.
Der Indikator THG beinhaltet die Verrechnung von in Produkten gespeicherten Kohlenstoff. Es werden der Import von biogenem Kohlenstoff in biogene Materialien aus vorgelagerten Produktsystemen sowie der Export von biogenem Kohlenstoff in nachgelagerte Produktsysteme angegeben. Die Werte werden jeweils in den Modulen deklarieret, in denen das biogene Material in das Produktsystem eingebracht bzw. es dieses verlässt angegeben.

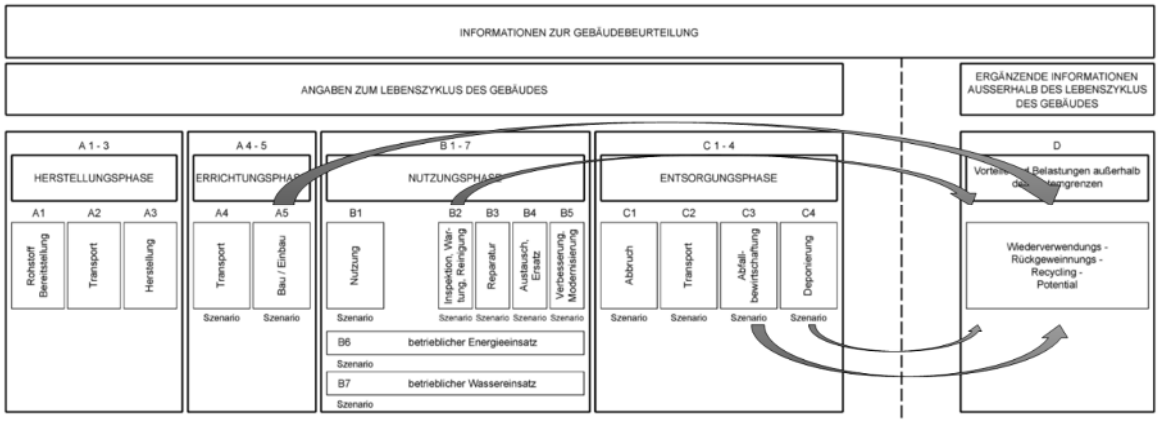


Abbildung 15 Übersicht der Lebenszyklusphasen die Modul D beeinflussen, geändert nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014)

6.3 Analyse des Recyclingpotenzials auf Produktebene

Die Analysen auf Produktebene werden auf Basis der Umweltproduktdeklarationen durchgeführt. Alle in der Ökobaudat 2016 enthaltenen Produktdatensätze wurden im ersten Schritt dahingehend analysiert welches Entsorgungsszenario hinterlegt wurde. Die Datenbank enthält ca. 1000 Produktdatensätze wovon ca. 600 (60%) Angaben über Modul D aufweisen. Die in Kapitel 6.1 beschriebenen Typen einer EPD bedingen, dass nicht alle Datensätze Angaben zu Modul D bereitstellen. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Entsorgungsszenarien wie nachfolgend kategorisieren lassen (Krause und Hafner 2018).

- thermische Verwertung Produkt
- stoffliche Verwertung Produkt
- thermische und stoffliche Verwertung Produkt
- thermische Verwertung Verpackungsmaterialien
- thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien
- mehrere Szenarien
- Sonstige

Grundsätzlich kann unterschieden werden in Szenarien die sich ausschließlich auf das Produkt beziehen. Die Szenarien beschreiben die thermische, stoffliche oder eine Kombination aus beider Recyclingwege in der Bilanzierung. Beispielsweise beschreibt der Datensatz „2.2.1 EPS- thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien Hartschaum (Styropor ®) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P-035“, dass „Gutschriften für elektrische und thermische Energie aus der energetischen Verwertung des Produktes“ angeführt werden. Eine weite Kategorie bilden die Produktökobilanzen bei denen sich die Gutschriften in Modul D ausschließlich aus der Verwertung des Verpackungsmaterials ergeben. Beispielsweise heißt es in dem Datensatz „5.1.01 Dispersionsputz“ „Gutschriften aus der Verbrennung der Verpackungsmaterialien und Recycling des Metallgebindes“. Der Datensatz „2.10.01 Holzfaserdämmplatte“ kann als Beispiel für die Kategorie „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ angeführt werden. In Bezug auf das recyclingpotenzial wird beschrieben, dass „die sich aus der thermischen Verwertung des Produkts und seiner Verpackung ergebenden Lasten und Potenziale am Ende seines Lebenswegs werden in Modul D bilanziert“. Die Kategorie „mehrere Szenarien“ charakterisiert die Datensätze welche eine Auswahlmöglichkeit des Entsorgungsszenarios bereitstellen. Beispielsweise ist im Datensatz „3.1.01 Hobelware (Durchschnitt DE)“ das Recyclingpotenzial für Modul D getrennt für eine thermische Verwertung und eine stoffliche Verwertung des Produktes angegeben. Unter dem Szenario „sonstige“ fallen die Datensätze, die ein Recyclingpotenzial angeben aber es nicht möglich war Angaben über das hinterlegte Entsorgungsszenario abzuleiten oder Modul D mit einer Null deklariert wurde. Abbildung 16 zeigt die Verteilung der Entsorgungsszenarien alle Datensätze der Ökobaudat welche einen Wert für Modul D angegeben haben. Mit 40 % dominiert das Szenario der „thermischen Verwertung des Verpackungsmaterials“. Gefolgt von der Kategorie „thermische und stoffliche Verwertung der Produkte“ mit 27 %. Die weiteren Szenarien sind mit unter 10% vertreten (Krause und Hafner 2018).

Abbildung 16 Verteilung der Entsorgungsszenarien von Recyclingpotenziale auf Basis der Ökobaudat-Datensätze

Tabelle 23 Verteilung der Entsorgungsszenarien unterteilt nach Materialtypen

Stoffgruppe / Entsorgungsszenario	Mineralische Baustoffe	Dämm-stoffe	Holz	Metalle	Beschich-tungen	Kunst-stoffe
"thermische Verwertung Produkt"	0,0 %	63,3 %	48,8 %	0,0 %	2,4 %	19,2 %
"stoffliche Verwertung Produkt"	12,7 %	6,7 %	0,0 %	93,5 %	0,0 %	0,0 %
"thermische und stoffliche Verwertung Produkt"	0,0 %	0,0 %	4,7 %	0,0 %	0,0 %	7,7 %
"thermische Verwertung Verpackungsmaterialien"	49,3 %	13,3 %	0,0 %	0,0 5	97,1 %	25,0 %
"thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien"	7,0 %	6,7 %	2,3 %	0,0 %	0,5 %	15,4 %
"mehrere Szenarien"	0,0 %	3,3 %	44,2 %	6,5 %	0,0 %	30,8 %
"Sonstige"	31,0 %	6,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,9 %

In einem zweiten Schritt wird die Verteilung der Entsorgungsszenarien materialspezifisch analysiert. Dazu werden die Verteilungen der Entsorgungsszenarien hinsichtlich der Hauptkategorien welche die Ökobaudat vorgibt analysiert (s. Tabelle 23).

Hinsichtlich der Annahmen der Entsorgungsszenarien ergeben sich materialspezifische Unterscheide. Bei 49 % der Datensätze für mineralische Baustoffe wird das Szenario der „Verwertung der Verpackungsmaterialien“ angesetzt. Des Weiteren ist bei 31 % das Modul D mit einem Wert von null deklariert das bedeutet in diesem Fall, „es finden keine Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingvorgänge statt“. Damit fällt der zweitgrößte Teil der mineralischen Baustoffe unter das Szenario „Sonstige“. Bei der Stoffgruppe der Dämmstoffe dominiert mit 63% das Szenario der „thermischen Verwertung des Produktes“. Die anderen Szenarien haben einen Anteil von unter 15%. Mit 49 % ist das Szenario der „thermischen Verwertung des Produktes“ bei der Kategorie Holz vertreten. Dies entspricht in der Regel einer thermischen Verwertung von Altholz in einem Biomassekraftwerk, wobei thermische und elektrische Energie gewonnen wird. Bei 44 % der Holzprodukte wird Modul D für “mehreren Szenarien“ ausgewiesen. Die Datensätze wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz“ (Rüter und Diederichs 2012) erstellt. Es wurden zwei Szenarien, eine 100%ige stofflich Nutzung und eine 100%igen energetischen Nutzung, definiert. Die Stoffgruppe Metall wird hauptsächlich (93,5 %) durch das Szenario der „stofflichen Verwertung des Produktes“ vertreten. Für 7 % dieser Stoffgruppe werden jeweils zwei Szenarien im Modul D deklariert. In diesem Fall wird unterschieden in die Szenarien einer 100%igen Deponierung der Metalle und einer 100%igen Wiederverwertung (Recycling) des Materials. Mit 97 % dominiert das Szenario „thermischen Verwertung der Verpackungsmaterialien“ bei der Stoffgruppe Beschichtungen.

Eine Verteilung über fast alle Szenarien liegt bei der Stoffgruppe Kunststoffe vor. Hauptsächlich wird das Szenario „mehrere Szenarien“ angegeben. Gefolgt von „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ (25,0 %) und dem Szenario „thermische Verwertung Produkt“ (19,2 %).

6.4 Analyse des Recyclingpotenzials auf Gebäudeebene

Die Analyse des Recyclingpotenzials auf Gebäudeebene wird auf Basis der Gebäudeökobilanzen welche im Rahmen des Forschungsprojektes (Hafner et al. 2017) erstellt wurden durchgeführt. Im ersten Schritt wird an ausgewählten Gebäudetypen die Verteilung der Entsorgungsszenarien auf Gebäudeebene dargestellt. Im zweiten Schritt wird im Detail Modul D auf Gebäudeebene analysiert. Dafür wurden die Indikatoren PERE/PENRE und THG herangezogen.

Abbildung 17 Verteilung der Entsorgungsszenarien von Recyclingpotenziale für ein EFH auf Basis der Ökobaudat-Datensätze

Die Verteilung der Entsorgungsszenarien wird anhand der EPD welche der Berechnungen der Gebäudeökobilanz zugrunde gelegt wurde analysiert. Das untersuchte Gebäude ist ein Einfamilienhaus (Bez. 1.1_M4) mit einer BGF von 315 m². Es wurde mit zwei Vollgeschossen im Jahr 2012 errichtet. Das Gebäude wurde im Original als Massivholzkonstruktion erreichtet und bilanziert. Fünf funktionell äquivalente Pendants aus mineralischen Konstruktionsmaterialien wurden erzeugt und bilanziert. Abbildung 17 zeigt die prozentuale Verteilung der Entsorgungsszenarien für das Gebäude mit einer Kalksandsteinkonstruktion. Mit 46,4 % dominiert das Szenario „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“. Darauf folget mit 26,2 % das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“. Die anderen Szenarien liegen mit weniger als 12 % vor. In Tabelle 24 sind die Verteilungen der Entsorgungsszenarien der sechs Gebäudevarianten gegenübergestellt. Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied bei der Verteilung der Entsorgungsszenarien im Vergleich der unterschiedlichen Gebäudekonstruktionen. Bei allen Varianten dominiert mit ca. 50 % das Szenario der „thermischen Verwertung Verpackungsmaterial“.

Das Ergebnis wird bestätigt mit der Analyse der Entsorgungsszenarien eines Mehrfamilienhauses (Bez. 2.7) (1.919 m² BGF, EG + 7OG, Baujahr 2011). Das Gebäude wurde in die Konstruktionsvarianten Massivholz, Porenbeton, Hochlochziegel mit Dämmputz und Hochlochziegel mit Mineralwolldämmung bilanziert. Das Szenario „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“ dominiert bei allen Gebäudevarianten. Der Anteil des Szenarios ist mit ca. 40 % geringer als bei den EFH.

Tabelle 24 Vergleich der Verteilung von Entsorgungsszenarien (EFH)

Gebäudebezeichnung u. Konstruktion / **Entsorgungsszenarien**	**1.1_H** Massivholz mit Zellulosedämmung	**1.1_M1** Stb. u. Mineralwolldämmung	**1.1_M2** Stb u. WDVS	**1.1_M3** Hlz, einschalig	**1.1_M4** Porenbeton	**1.1_M5** KS u. WDVS
"thermische Verwertung Produkt"	3,8%	2,8%	3,0%	3,1%	3,3%	3,1%
"stoffliche Verwertung Produkt"	26,8%	26,4%	26,5%	26,4%	26,2%	26,2%
"thermische und stoffliche Verwertung Produkt"	10,4%	11,1%	10,6%	10,9%	11,2%	11,3%
"thermische Verwertung Verpackungsmaterialien"	45,9%	46,7%	46,9%	46,4%	46,3%	46,4%
"thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien"	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,2%	0,1%
"mehrere Szenarien"	7,5%	6,3%	6,3%	6,2%	6,3%	6,2%
"Sonstige"	5,5%	6,9%	6,7%	6,6%	6,4%	6,7%

Tabelle 25 Vergleich der Verteilung von Entsorgungsszenarien (MFH)

Gebäudebezeichnung u. Konstruktion / Entsorgungsszenarien	2.7_H	2.7_M1	2.7_M2	2.7_M3
	Massivholz mit Zellulosedämmung	Porenbeton	Hlz, Dämmputz	Hlz, Mineralwolldämmung
"thermische Verwertung Produkt"	4,2%	3,5%	3,6%	3,3%
"stoffliche Verwertung Produkt"	29,9%	30,1%	30,0%	30,1%
"thermische und stoffliche Verwertung Produkt"	14,0%	16,3%	16,0%	16,3%
"thermische Verwertung Verpackungsmaterialien"	38,1%	39,6%	39,9%	39,7%
"thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien"	0,0%	0,1%	0,3%	0,1%
"mehrere Szenarien"	4,1%	2,0%	2,0%	2,0%
"Sonstige"	9,8%	8,3%	8,3%	8,4%

6.4.1 Indikator Primärenergie

Die Werte des Moduls D beschreiben die aus dem betrachteten Produktsystem gewonnene Energie, welche zu einer vermiedenen Energie im nächsten Produktsystem führt. Oder es ergeben sich Sekundärmaterialien bzw. Brennstoffe aus dem betrachteten Produktsystem, die die Neugewinnung von Primärmaterial bzw. primäre Brennstoffe im nächsten System substituieren. Die Werte der Indikatoren PERE und PENRE für Modul D je Gebäude (EZFH u. MFH) wurden ermittelt und Mittelwerte in Abhängigkeiten der Konstruktionstypen Massivholz, Holzständerkonstruktion und mineralische Konstruktionen gebildet. Die gewählte Einteilung der Mittelwerte ist Grundlage für die Übertragung der Werte auf ein Untersuchungsgebietes (s. Kapitel 7).

In Abbildung 18 sind die Werte aller bilanzierten EZFH für den Indikator PERE für Modul D dargestellt. Die Massivholzkonstruktionen zeigen einen Mittelwert von -1423 MJ/m² BGF für den Indikator PERE auf. Bei den Holzständerkonstruktionen liegen der Mittelwert bei -267 MJ/m² BGF. Mit -159 MJ/m² BGF Mittelwert zeigen die mineralischen Konstruktionen bei dem Indikator PERE den geringsten Wert.
Abbildung 19 zeigt die Werte der bilanzierten EZFH für den Indikator PENRE für Modul D. Die Gebäude mit mineralischer Konstruktion zeigen im Mittel einen Wert von -917 MJ/m² BGF. Im Mittel liegt der Wert bei den Holzkonstruktionen mit -2126 MJ/m² BGF (Holzständerkonstruktion) und -3192 MJ/m² BGF (Massivholzkonstruktion) darüber. Die Gebäude mit einer Konstruktion aus Holz weisen dementsprechend für die Indikatoren PERE und PENRE ein höheres Recyclingpotenzial gegenüber den mineralischen Gebäuden auf.

Der Grund dafür ist die größere Menge an verbautem Holz in den Holzgebäuden sowie die Annahme des Entsorgungsszenarios der thermischen Verwertung. Der Wert in Modul D setzt sich unter anderem zusammen aus den Verbrennungsprozess von Altholz als Lasten und die Substitution der Erzeugung thermischer Energie aus Erdgas und elektrischer Energie nach deutschem Strommix 2009 als Gutschrift (Rüter und Diederichs 2012).

Bei den mineralischen Gebäuden ergeben sich Gutschriften z.B. durch die thermische Verwertung von Kunststoffen (Folien, Bodenbeläge, Dämmungen) und durch das Recycling von Bauschutt. In Abbildung 20 und Abbildung 21 sind die Werte der MFH dargestellt. Die Mittelwerte des Indikators PERE liegen bei – 298 MJ/m² BGF (Massivholzkonstruktion), -225 MJ/m² BGF (Holzständerkonstruktion) sowie – 122 MJ/m² BGF (mineralische Konstruktion). Die Mittelwerte des Indikators PENRE liegen bei – 2065 MJ/m² BGF (Massivholzkonstruktion), - 2231 MJ/m² BGF Holzständerkonstruktion und -794 MJ/m² BGF (mineralische Konstruktion). Die Werte der MFH bestätigen die, dass die Gebäude mit einer Holzkonstruktion gegenüber der mineralischen Konstruktion für die Indikatoren PERE und PENRE ein höheres Recyclingpotenzial zeigen.

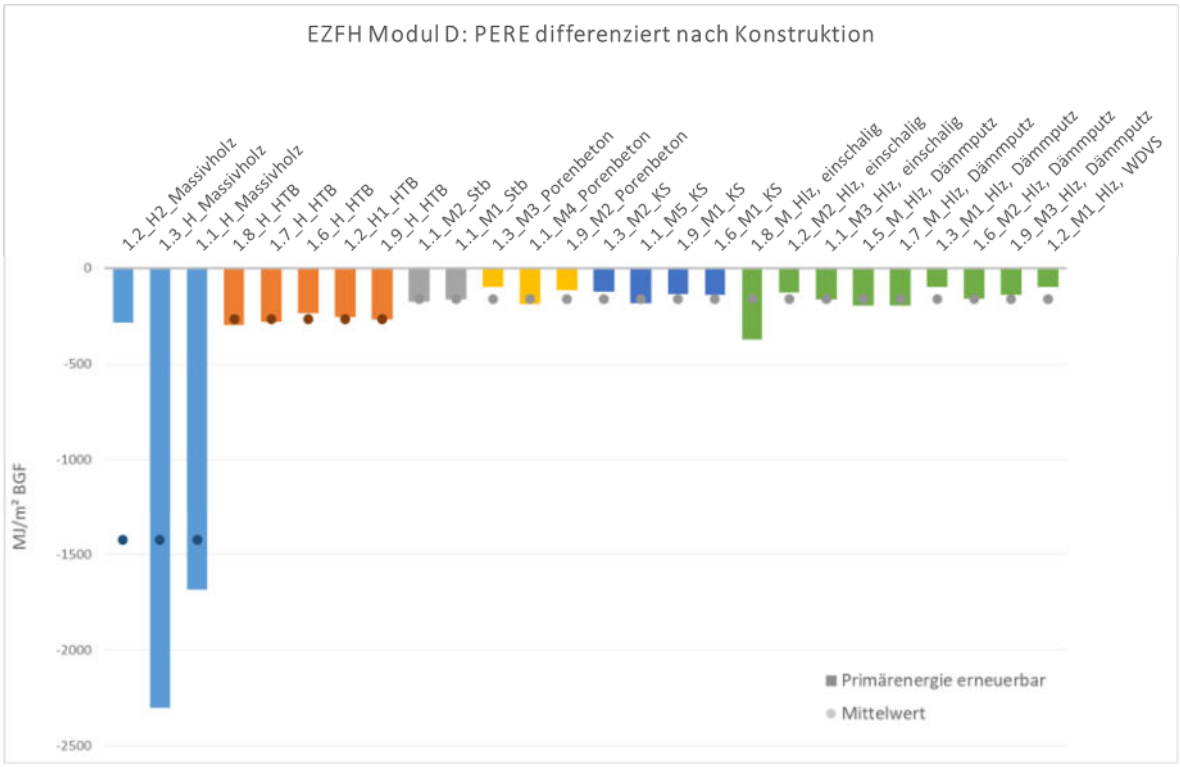


Abbildung 18 Primärenergie erneuerbar für Konstruktion aller EZFH für Modul D

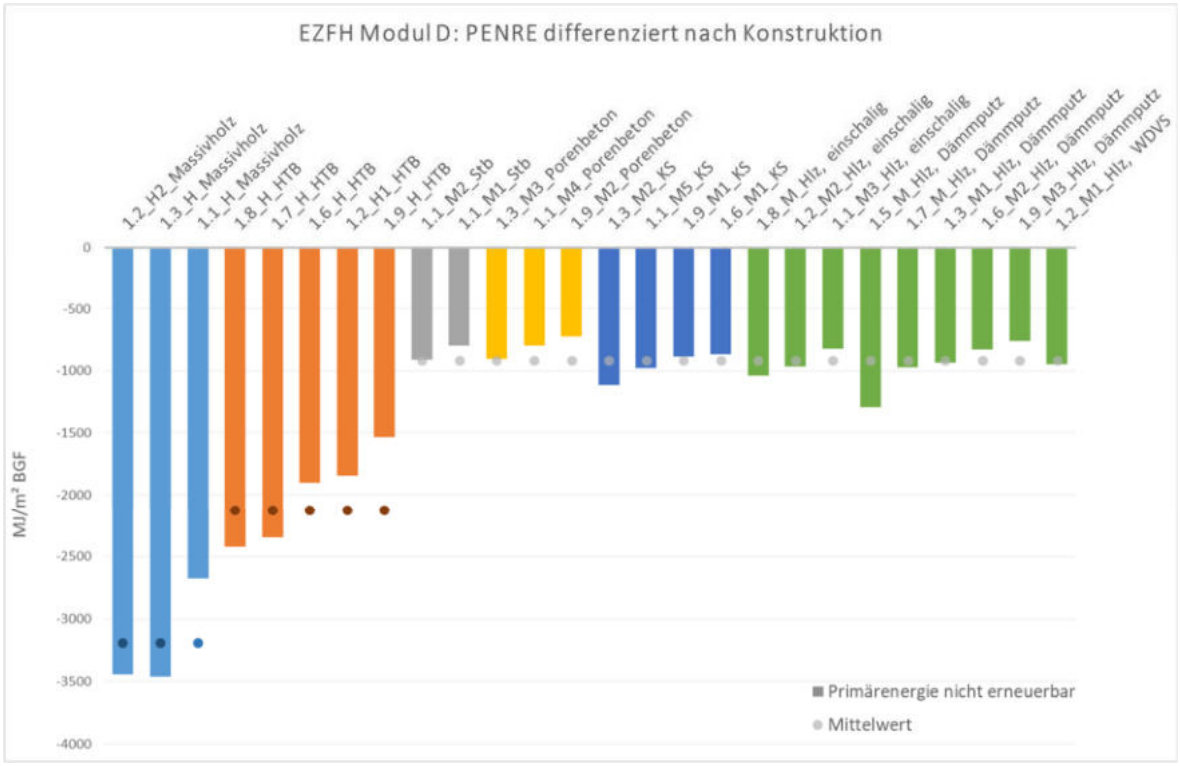


Abbildung 19 Primärenergie nicht erneuerbar für Konstruktion aller EZFH für Modul D

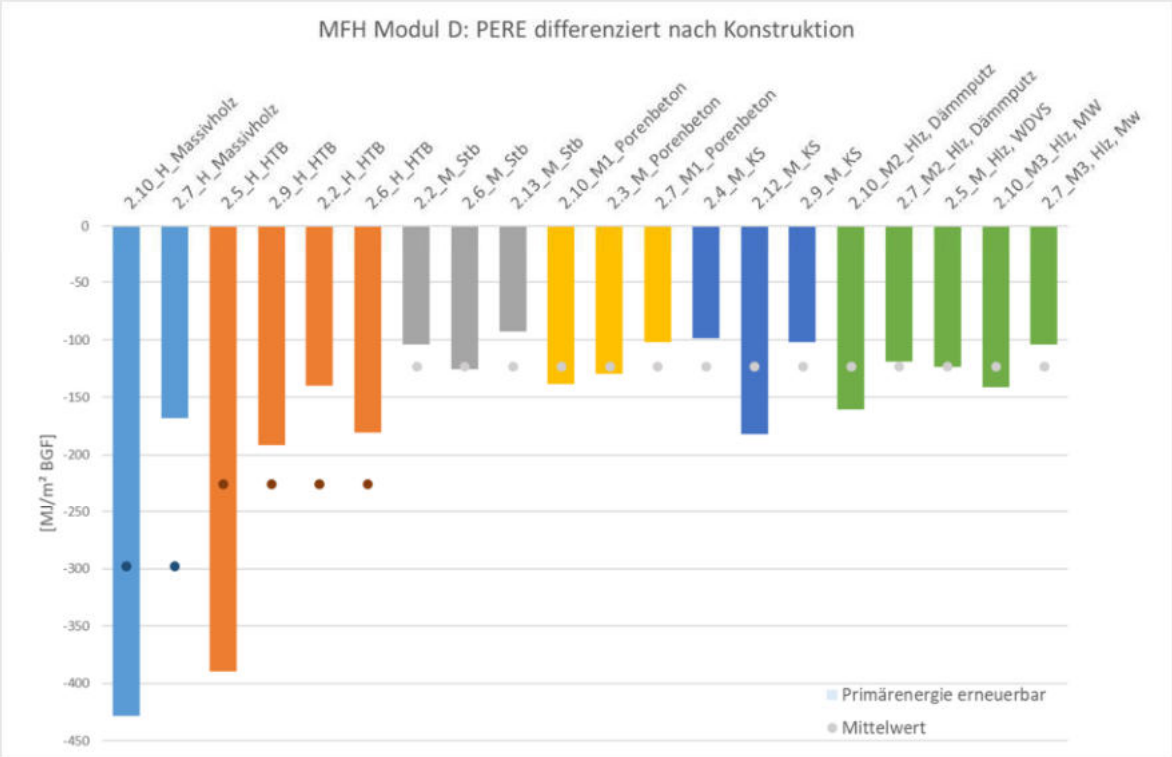


Abbildung 20 Primärenergie erneuerbar für Konstruktion aller MFH für Modul D

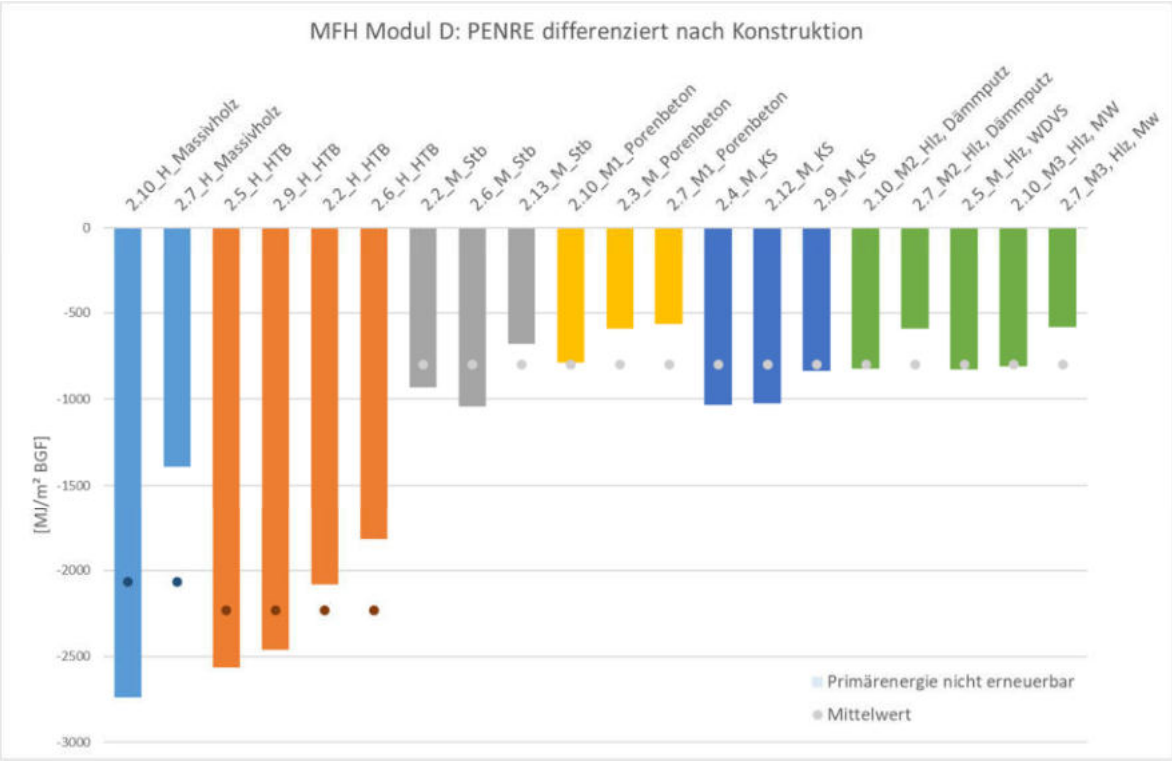


Abbildung 21 Primärenergie nicht erneuerbar für Konstruktion aller MFH für Modul D

6.4.2 Anteile der Entsorgungsszenarien am Indikator PERE/PENRE

Der Indikatoren PERE und PENRE beschreiben die Recyclingpotenziale auf Gebäudeebene. Im Folgenden wird analysiert welchen Einfluss die in Kapitel 6.3 beschrieben Entsorgungsszenarien der Produktebene auf Gebäudeebene bezogen auf die Indikatoren aufweisen. Zu beachten sind hier insbesondere die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterial“. Die Verwertung von Verpackungsmaterialien innerhalb eine Produktsystems ist nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen

— Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) im Modul A5 zu berücksichtigen und die Gutschriften und Lasten in Modul D auszuweisen. Wird das Produktsystem auf Ebnen der Gebäudelebenszyklus und unter der Annahme das Modul D das Recyclingpotenzial der im Gebäude verbauten Materialien darstellt, zeigen sich in Bezug auf die genannten Entsorgungsszenarien Lücken hinsichtlich der materialspezifischen Informationen.

Daraus folgt das diese Datensätze keine Informationen über das Recyclingpotenzial des im Gebäude verbauten Materials liefert. Nachfolgend soll auf Gebäudeebene analysiert werden welchen Anteil die Entsorgungsszenarien an dem Indikator PERE und PENRE aufweisen. Abbildung 22 zeigt die prozentuale Verteilung der Entsorgungsszenarien am Indikator PERE beispielhaft für das Gebäude 1.1_M5. Das Szenario „thermische Verwertung Produkt“ dominiert mit 58 %. Das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ hat einem Anteil von 24% am Indikator PERE. Die anderen Szenarien weisen einen Anteil von weniger als 10 % auf.

Die prozentuale Verteilung der Entsorgungsszenarien im Indikator PENRE ist in Abbildung 23 dargestellt. Mit 40 % dominiert das Szenario „mehrere Szenarien“. Das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ zeigt einen Anteil von 25% gefolgt von dem Szenario „thermische Verwertung Produkt“ mit 22 %. Die weiteren Szenarien weisen einen Anteil unter 10 % auf.

Das Szenario „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“ zeigt bei PERE einen Anteil von 6 % und bei PENRE 8 %. Einen Anteil 0,1 % (PERE) und 0,0 % (PENRE) zeigt das Szenario „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterial“. In Summe sind dementsprechend 6 % des Wertes für PERE und 8 % des Wertes für PENRE nicht geeignet um das Recyclingpotenzial des im Gebäude verbauten Materials abzubilden. Für das hier betrachtetet Beispielgebäude stehen demgegenüber 94 % Anteil des Wertes für PERE und 92 % Anteil des Wertes PENRE die auf Basis von EPD ermittelt wurden die Aussagen über das Recyclingpotenzial der im Gebäude verbauten Material liefern.

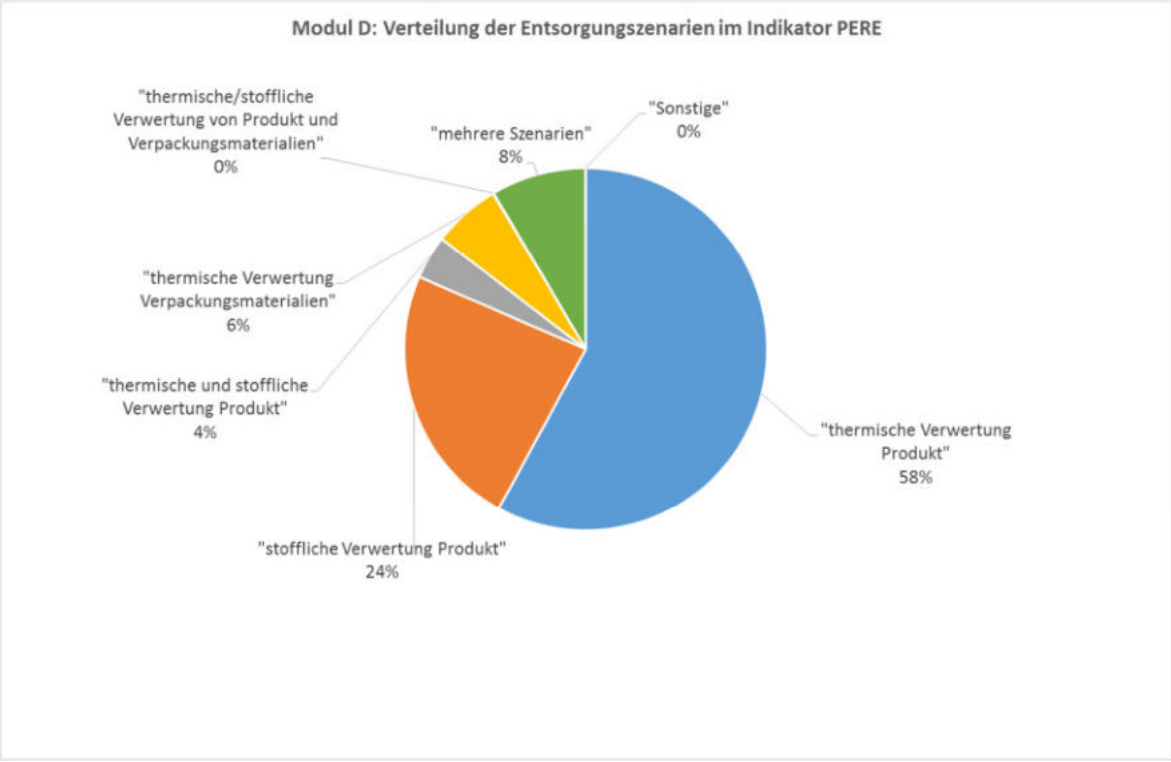


Abbildung 22 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE, EFZH (1.1_M5)

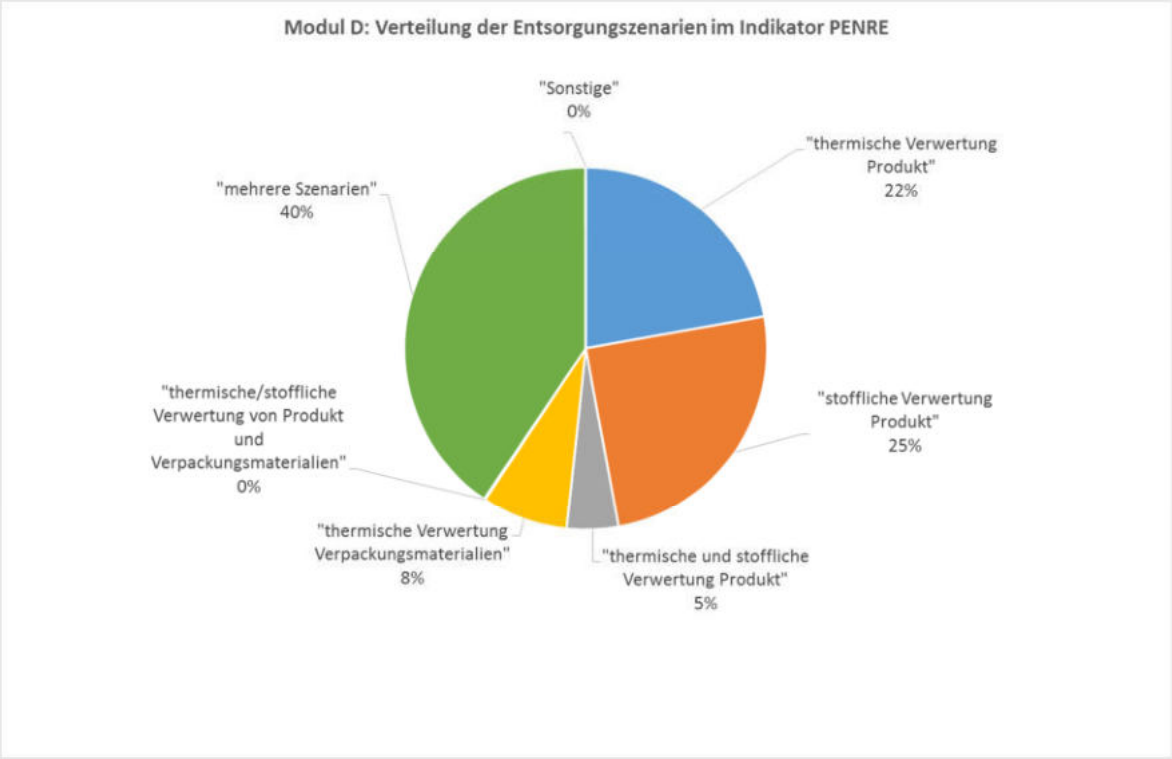


Abbildung 23 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PENRE, EFZH (1.1_M5)

In Tabelle 26 ist die Verteilung der Entsorgungsszenarien für die Indikatoren PERE und PENRE unterteilt nach EZFH dargestellt. Die Werte des Indikators PERE werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „thermische Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei dem mineralischen Gebäude dominiert das Szenario „thermische Verwertung Produkt“. Durchschnittlich hat das Szenario „thermische Verwertung Produkt“ einen Anteil von 41,3 % gefolgt von dem Szenario „mehrere Szenarien“ mit 24,1 % und „stoffliche Verwertung Produkt“ (19,8 %). Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel Anteile von 9,6% und 0,7% auf.

Die Werte des Indikators PENRE werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „stoffliche Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei den mineralischen Gebäuden dominiert das Szenario „mehrere Szenarien“ den Indikator PENRE. Durchschnittlich hat das Szenario „mehrere Szenarien“ einen Anteil von 58,1 % gefolgt von dem Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ mit 17,6 % und „thermische Verwertung Produkt“ (9,3 %). Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel einen Anteil von 9,1% und 1,3 % auf.

In Tabelle 27 sind die Verteilung der Entsorgungsszenarien für die Indikatoren PERE und PENRE unterteilt nach MFH dargestellt. Die Werte des Indikators PERE werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „stoffliche Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei dem mineralischen Gebäude dominiert das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“. Durchschnittlich hat das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ einen Anteil von 33,8 % gefolgt von dem Szenario „thermische Verwertung Produkt“ mit 27,9 % und „mehrere Szenarien“ (19,1 %). Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel Anteile von 11,9 % und 0,2% auf.

Die Werte des Indikators PENRE werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „stoffliche Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei den mineralischen Gebäuden dominiert das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ den Indikator PENRE. Durchschnittlich hat das Szenario „mehrere Szenarien“ einen Anteil von 40,2 % gefolgt von dem Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ mit 35,7 %. Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel einen Anteil von 10,4 % und 0,5 % auf.

Tabelle 26 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE und PENRE, EZFH

Gebäude (EZFH)	"thermische Verwertung Produkt"	"stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische und stoffliche Verwertung Pro	"thermische Verwertung Verpackungsma	"thermische/stoffliche Verwertung von Pro	"mehrere Szenarien"	"Sonstige"	"thermische Verwertung Produkt"	"stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische und stoffliche Verwer	"thermische Verwertung Verpa-	"thermische/stoffliche Verwertung	"mehrere Szenarien"	"Sonstige"
	Primärenergie erneuerbar (PERE)							Primärenergie nicht erneuerbar (PENRE)r						
1.2_H2_Massivholz	38,5%	11,6%	1,6%	5,6%	0,0%	42,7%	0,0%	2,1%	5,5%	1,0%	2,2%	0,0%	89,3%	0,0%
1.3_H_Massivholz	12,5%	1,1%	0,2%	1,3%	0,0%	85,0%	0,0%	5,0%	4,7%	0,8%	2,5%	0,0%	87,1%	0,0%
1.1_H_Massivholz	26,7%	1,8%	0,2%	0,6%	0,0%	70,7%	0,0%	9,3%	6,0%	1,0%	2,3%	0,0%	81,5%	0,0%
1.8_H_HTB	35,5%	15,3%	1,8%	3,8%	0,0%	43,6%	0,0%	3,0%	12,0%	1,5%	3,2%	0,0%	80,3%	0,0%
1.7_H_HTB	31,8%	26,5%	2,6%	6,4%	0,0%	32,6%	0,0%	3,1%	18,2%	2,2%	5,2%	0,0%	71,2%	0,0%
1.6_H_HTB	36,5%	15,4%	2,4%	5,2%	0,0%	40,5%	0,0%	3,3%	12,4%	2,1%	4,2%	0,0%	78,0%	0,0%
1.2_H1_HTB	55,4%	12,9%	1,9%	3,5%	0,0%	26,3%	0,0%	4,7%	8,7%	1,9%	3,8%	0,0%	80,9%	0,0%
1.9_H_HTB	66,1%	9,2%	2,0%	6,2%	0,0%	16,5%	0,0%	8,1%	10,3%	2,5%	7,7%	0,0%	71,4%	0,0%
1.1_M2_Stb	59,9%	20,6%	4,9%	5,9%	0,0%	8,8%	0,0%	23,7%	19,3%	5,9%	7,3%	0,0%	43,6%	0,0%
1.1_M1_Stb	58,3%	20,4%	5,6%	6,1%	0,0%	9,6%	0,0%	12,3%	23,0%	7,0%	7,9%	0,0%	49,7%	0,0%
1.3_M3_Porenbeton	9,1%	25,2%	7,1%	31,7%	0,1%	26,8%	0,0%	4,0%	15,4%	4,9%	13,2%	0,1%	62,3%	0,0%
1.1_M4_Porenbeton	66,0%	16,2%	3,6%	5,8%	0,1%	8,3%	0,0%	15,3%	19,9%	5,4%	9,3%	0,3%	49,8%	0,0%
1.9_M2_Porenbeton	42,7%	21,3%	6,9%	15,1%	0,1%	13,9%	0,0%	8,1%	21,1%	7,5%	17,9%	0,1%	45,3%	0,0%
1.3_M2_KS	16,2%	30,6%	6,5%	25,4%	0,1%	21,2%	0,0%	13,5%	20,3%	4,6%	11,0%	0,1%	50,5%	0,0%
1.1_M5_KS	58,0%	23,5%	3,9%	6,1%	0,1%	8,5%	0,0%	22,2%	24,9%	4,6%	7,7%	0,1%	40,5%	0,0%
1.9_M1_KS	42,8%	25,8%	6,3%	13,1%	0,1%	11,9%	0,0%	16,7%	25,0%	6,4%	14,7%	0,1%	37,0%	0,0%
1.6_M1_KS	43,1%	25,9%	7,1%	10,0%	0,0%	13,9%	0,0%	10,3%	23,3%	7,5%	12,1%	0,0%	46,8%	0,0%
1.8_M_Hlz, einschalig	77,0%	10,0%	2,6%	3,6%	0,9%	5,9%	0,0%	15,7%	19,6%	5,9%	10,7%	3,3%	44,8%	0,0%
1.2_M2_Hlz, einschalig	34,3%	26,6%	5,2%	7,4%	4,0%	22,4%	0,0%	5,9%	16,5%	4,6%	8,3%	5,6%	59,2%	0,0%
1.1_M3_Hlz, einschalig	58,8%	18,6%	3,7%	6,8%	2,7%	9,5%	0,0%	13,1%	19,2%	4,6%	9,2%	5,8%	48,1%	0,0%
1.5_M_Hlz, Dämmputz	45,1%	15,7%	4,2%	7,8%	2,4%	24,7%	0,0%	6,0%	17,6%	4,0%	9,5%	3,9%	58,9%	0,0%
1.7_M_Hlz, Dämmputz	39,5%	37,5%	6,6%	9,5%	1,1%	5,6%	0,0%	12,2%	39,0%	8,7%	15,2%	2,4%	22,6%	0,0%
1.3_M1_Hlz, Dämmputz	8,5%	24,6%	6,5%	30,5%	3,7%	26,1%	0,0%	3,5%	15,0%	4,5%	12,4%	4,3%	60,3%	0,0%
1.6_M2_Hlz, Dämmputz	52,3%	20,1%	6,0%	8,5%	0,8%	12,2%	0,0%	7,8%	21,8%	7,6%	12,1%	1,8%	49,1%	0,0%
1.9_M3_Hlz, Dämmputz	50,8%	17,7%	5,3%	12,3%	2,3%	11,6%	0,0%	9,0%	20,0%	6,7%	16,7%	4,5%	43,1%	0,0%
1.2_M1_Hlz, WDVS	9,3%	41,4%	9,0%	11,4%	0,1%	28,8%	0,0%	4,4%	18,9%	6,0%	10,2%	0,2%	60,3%	0,0%

Tabelle 27 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE und PENRE, MFH

Gebäude (MFH)	"thermische Verwertung Produkt"	"stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische und stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische Verwertung Verpackungs-materialien"	"thermi-sche/stoffli-che Verwer-	"mehrere Sze-narien"	"Sonstige"	"thermische Verwertung Produkt"	"stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische und stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische Verwertung Verpackungs-materialien"	"thermi-sche/stoffli-che Verwer-	"mehrere Sze-narien"	"Sonstige"
	Primärenergie erneuerbar (PERE)							Primärenergie nicht erneuerbar (PENRE)						
2.10_H_Massivholz	16,4%	11,5%	0,9%	3,2%	0,0%	68,1%	0,0%	2,9%	13,4%	0,9%	3,2%	0,0%	79,5%	0,0%
2.7_H_Massivholz	18,4%	48,0%	4,7%	7,3%	0,0%	21,6%	0,0%	5,1%	45,1%	3,6%	6,4%	0,1%	39,7%	0,0%
2.5_H_HTB	55,7%	22,1%	1,3%	4,4%	0,0%	16,4%	0,0%	7,8%	17,9%	1,3%	4,3%	0,0%	68,6%	0,0%
2.9_H_HTB	13,1%	17,4%	2,1%	8,1%	0,0%	59,3%	0,0%	0,8%	12,4%	1,1%	4,3%	0,0%	81,3%	0,0%
2.2_H_HTB	1,7%	38,2%	4,1%	22,3%	0,0%	33,6%	0,0%	0,9%	25,9%	1,8%	11,4%	0,0%	59,9%	0,0%
2.6_H_HTB	7,7%	33,3%	1,9%	5,1%	0,0%	52,0%	0,0%	1,0%	26,5%	1,3%	3,5%	0,0%	67,6%	0,0%
2.2_M_Stb	7,4%	52,6%	9,2%	27,5%	0,0%	3,3%	0,1%	7,9%	55,9%	6,5%	24,1%	0,0%	5,5%	0,0%
2.6_M_Stb	18,4%	48,0%	4,7%	7,3%	0,1%	21,6%	0,0%	5,1%	45,1%	3,6%	6,4%	0,1%	39,7%	0,0%
2.13_M_Stb	36,5%	28,7%	11,3%	17,5%	0,0%	6,0%	0,0%	18,9%	41,9%	9,6%	13,0%	0,0%	16,5%	0,0%
2.10_M1_Porenbeton	42,8%	35,2%	6,0%	9,1%	0,1%	6,8%	0,0%	10,0%	43,6%	6,6%	10,9%	0,1%	28,7%	0,0%
2.3_M_Porenbeton	24,5%	22,2%	8,8%	39,0%	0,1%	5,4%	0,0%	6,8%	37,7%	12,0%	19,9%	0,2%	23,4%	0,0%
2.7_M1_Porenbeton	51,4%	22,7%	7,3%	9,2%	0,1%	9,3%	0,0%	9,6%	34,7%	8,3%	11,0%	0,1%	36,2%	0,0%
2.4_M_KS	14,0%	48,2%	9,8%	9,5%	0,0%	17,1%	0,0%	13,6%	38,5%	5,9%	7,4%	0,0%	34,5%	0,0%
2.12_M_KS	22,3%	34,6%	5,8%	8,6%	0,0%	10,0%	0,0%	5,6%	36,0%	6,7%	11,9%	0,1%	39,8%	0,0%
2.9_M_KS	20,2%	36,5%	9,6%	17,3%	0,2%	16,3%	0,0%	3,8%	34,1%	7,3%	16,1%	0,2%	38,6%	0,0%
2.10_M2_Hlz, Dämmputz	49,3%	30,4%	4,8%	7,7%	1,8%	5,9%	0,0%	10,6%	41,9%	5,9%	10,2%	3,9%	27,5%	0,0%
2.7_M2_Hlz, Dämmputz	57,0%	19,5%	5,9%	7,8%	1,9%	8,0%	0,0%	10,3%	33,2%	7,5%	10,2%	4,1%	34,6%	0,0%
2.5_M_Hlz, WDVS	9,2%	67,4%	8,2%	9,5%	0,1%	5,6%	0,0%	12,8%	49,5%	7,6%	11,6%	0,1%	18,3%	0,0%
2.10_M3_Hlz, MW	41,8%	36,0%	6,4%	9,0%	0,1%	6,7%	0,0%	9,4%	44,9%	6,9%	10,7%	0,1%	27,9%	0,0%
2.7_M3, Hlz, Mw	50,2%	23,8%	7,7%	9,1%	0,1%	9,1%	0,0%	8,9%	36,5%	8,6%	10,7%	0,1%	35,1%	0,0%

6.4.3 Indikator Treibhauspotenzial

Der Indikator THG weist die durch die Entsorgungsszenarien substituierte Umweltbelastung bzw. den Export von biogenem Kohlenstoff in nachgelagerte Produktsysteme aus. Die Werte des Indikators THG für Modul D je Gebäude (EZFH u. MFH) wurde ermittelt und Mittelwerte in Abhängigkeiten der Konstruktionstypen Massivholz, Holzständerkonstruktion und mineralische Konstruktionen gebildet. Die gewählte Einteilung der Mittelwerte ist Grundlage für die Übertragung der Werte auf ein Untersuchungsgebiet (s. Kapitel 7).

In Abbildung 24 sind die Werte aller bilanzierten EZFH für den Indikator THG für Modul D dargestellt. Die Massivholzkonstruktionen zeigen einen Mittelwert von -173 kg CO_2-äq/m² BGF für den Indikator THG auf. Bei den Holzständerkonstruktionen liegen der Mittelwert bei -114 CO_2-äq/m² BGF. Mit -58 CO_2-äq/m² BGF Mittelwert zeigen die mineralischen Konstruktionen bei dem Indikator THG den geringsten Wert.

In Abbildung 25 sind die Werte der MFH dargestellt. Die Mittelwerte des Indikators THG liegen bei – 131 CO_2-äq/m² BGF (Massivholzkonstruktion), -138 CO_2-äq/m² BGF (Holzständerkonstruktion) sowie – 59 CO_2-äq/m² BGF (mineralische Konstruktion). Die Werte der MFH bestätigen die, dass die Gebäude mit einer Holzkonstruktion gegenüber der mineralischen Konstruktion für die Indikator THG ein höheres Recyclingpotenzial zeigen.

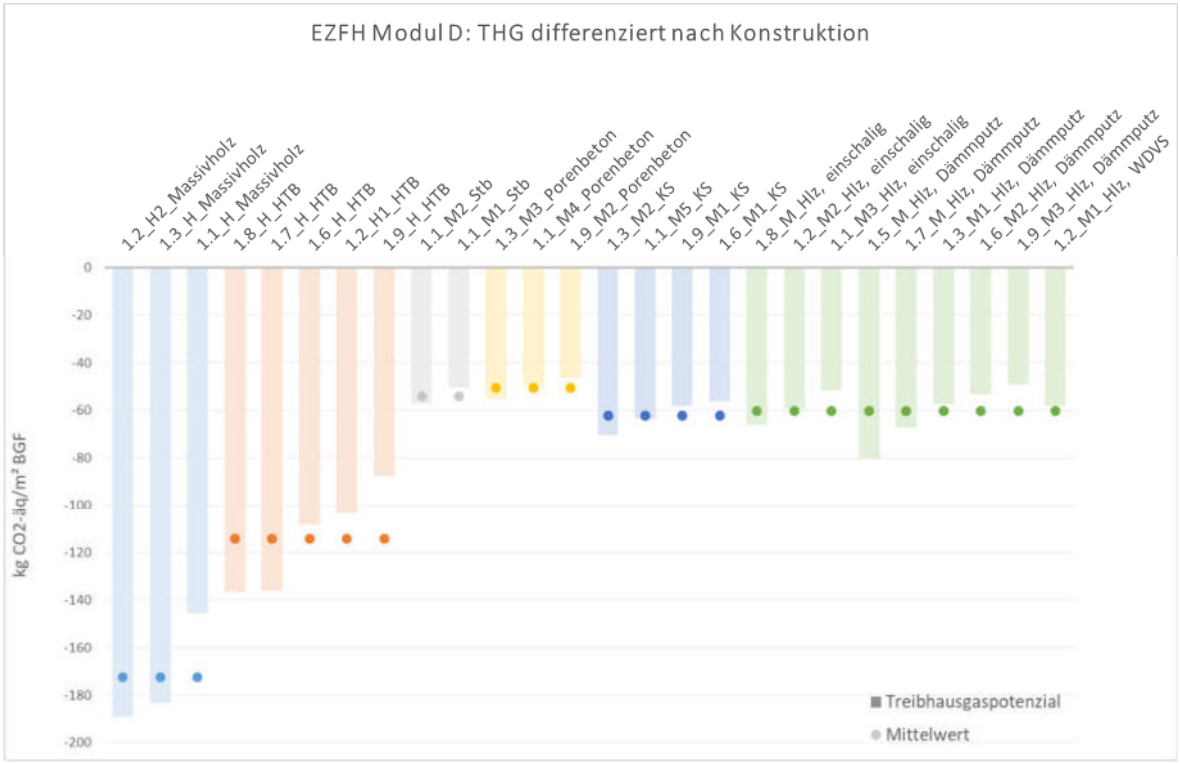


Abbildung 24 Treibhauspotenzial für Konstruktion aller EZFH für Modul D

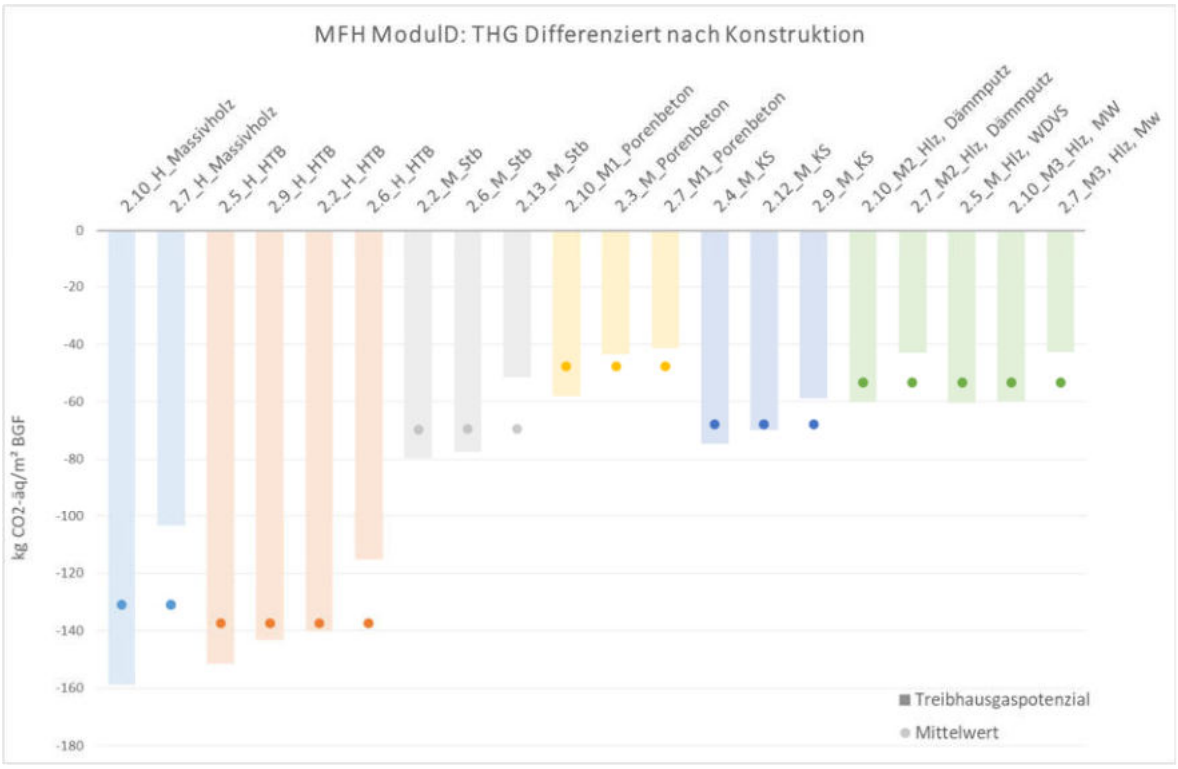


Abbildung 25 Treibhauspotenzial für Konstruktion aller MFH für Modul D

6.4.4 Anteile der Entsorgungsszenarien am Indikator THG

Im Folgenden wird analysiert welchen Einfluss die in Kapitel 6.3 beschrieben Entsorgungsszenarien der Produktebene auf Gebäudeebene bezogen auf die Indikatoren aufweisen. Zu beachten sind hier insbesondere die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterial“. Die Verwertung von Verpackungsmaterialien innerhalb eine Produktsystems ist nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) im Modul A5 zu berücksichtigen und die Gutschriften und Lasten in Modul D auszuweisen. Wird das Produktsystem auf Gebäudeebene betrachtet und angenommen, dass Modul D das Recyclingpotenzial der im Gebäude verbauten Materialien darstellt, zeigen sich in Bezug auf die genannten Entsorgungsszenarien Lücken hinsichtlich der materialspezifischen Informationen.

Daraus folgt das diese Datensätze keine Informationen über das Recyclingpotenzial des im Gebäude verbauten Materials liefert. Nachfolgend soll auf Gebäudeebene analysiert werden welchen Anteil die Entsorgungsszenarien an dem Indikator THG aufweisen. Abbildung 26 zeigt die prozentuale Verteilung der Entsorgungsszenarien am Indikator THG beispielhaft für das Gebäude 1.1_M5. Das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ dominiert mit 33 %. Das Szenario „mehrere Szenarien“ hat einem Anteil von 31 % gefolgt von dem Szenario „thermische Verwertung Produkt“. Die anderen Szenarien weisen einen Anteil von weniger als 10 % auf. Das Szenario „thermische Verwertung Verpackungsmaterial“ zeigt bei THG einen Anteil von 8 %. Einen Anteil 0,1 % zeigt das Szenario „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterial“. In Summe sind dementsprechend 8,1 % des Wertes für THG und 8 % nicht geeignet um das Recyclingpotenzial der im Gebäude verbauten Materials abzubilden.

Für das hier betrachtetet Beispielgebäude stehen demgegenüber 91,9 % Anteil des Wertes für THG, die auf Basis von EPDs ermittelt wurden, welche Aussagen über das Recyclingpotenzial der im Gebäude verbauten Material liefern können.

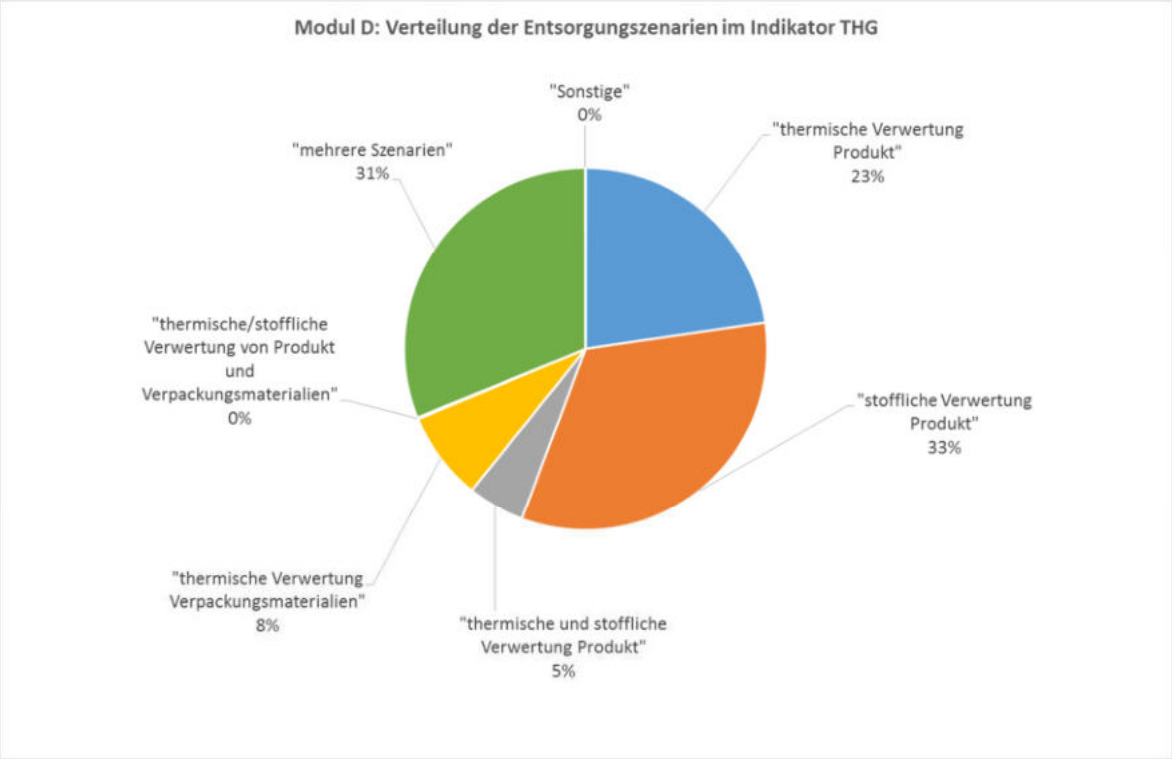


Abbildung 26 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator THG, EFZH (1.1_M5)

Tabelle 28 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator Treibhauspotenzial, EZFH

Gebäude (EZFH)	"thermische Verwertung Produkt"	"stoffliche Verwertung Produkt"	"thermische und stoffliche Verwer-	"thermische Verwertung Verpackungsmaterialien"	"thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsma-	"mehrere Szenarien"	"Sonstige"
	Treibhauspotenzial (THG)						
1.2_H2_Massivholz	2,5%	9,4%	1,3%	2,7%	0,0%	84,1%	0,0%
1.3_H_Massivholz	6,2%	8,5%	1,1%	3,2%	0,0%	81,0%	0,0%
1.1_H_Massivholz	11,4%	9,8%	1,2%	2,8%	0,0%	74,8%	0,0%
1.8_H_HTB	3,5%	19,6%	1,8%	3,8%	0,0%	71,2%	0,0%
1.7_H_HTB	3,6%	26,8%	2,6%	6,0%	0,0%	61,0%	0,0%
1.6_H_HTB	3,8%	20,3%	2,5%	5,0%	0,0%	68,4%	0,0%
1.2_H1_HTB	5,6%	13,7%	2,5%	4,5%	0,0%	73,7%	0,0%
1.9_H_HTB	9,4%	16,1%	3,2%	9,0%	0,0%	62,3%	0,0%
1.1_M2_Stb	24,8%	26,3%	6,7%	7,8%	0,0%	34,4%	0,0%
1.1_M1_Stb	12,9%	31,7%	8,0%	8,4%	0,0%	39,1%	0,0%
1.3_M3_Porenbeton	4,3%	23,9%	5,8%	14,4%	0,2%	51,5%	0,0%
1.1_M4_Porenbeton	16,3%	27,8%	6,1%	9,9%	0,4%	39,6%	0,0%
1.9_M2_Porenbeton	8,4%	28,6%	8,3%	18,6%	0,2%	35,9%	0,0%
1.3_M2_KS	14,0%	28,8%	5,2%	11,6%	0,1%	40,3%	0,0%
1.1_M5_KS	22,7%	33,0%	5,1%	7,9%	0,1%	31,1%	0,0%
1.9_M1_KS	16,7%	32,6%	7,0%	14,9%	0,1%	28,7%	0,0%
1.6_M1_KS	10,5%	31,7%	8,1%	12,5%	0,0%	37,2%	0,0%
1.8_M_Hlz, einschalig	16,5%	27,4%	6,6%	11,2%	3,6%	34,8%	0,0%
1.2_M2_Hlz, einschalig	6,3%	23,5%	5,4%	8,9%	6,2%	49,6%	0,0%
1.1_M3_Hlz, einschalig	13,8%	26,9%	5,2%	9,8%	6,3%	38,0%	0,0%
1.5_M_Hlz, Dämpft	6,4%	26,5%	4,6%	10,1%	4,3%	48,0%	0,0%
1.7_M_Hlz, Dämpft	11,6%	46,1%	8,8%	14,6%	2,4%	16,7%	0,0%
1.3_M1_Hlz, Dämpft	3,8%	23,1%	5,3%	13,4%	4,8%	49,6%	0,0%
1.6_M2_Hlz, Dämpft	8,0%	30,3%	8,2%	12,5%	1,9%	39,1%	0,0%
1.9_M3_Hlz, Dämpft	9,2%	27,2%	7,4%	17,2%	4,8%	34,1%	0,0%
1.2_M1_Hlz, WDVS	4,8%	26,3%	7,1%	11,1%	0,2%	50,6%	0,0%

In Tabelle 28 ist die Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator THG unterteilt nach EZFH dargestellt. Durchschnittlich hat das Szenario „mehrere Szenarien“ einen Anteil von 49,0 % gefolgt von dem Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ mit 24,8 % und „thermischer Verwertung Produkt“ (9,9 %). Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel Anteile von 9,7 % und 1,4 % auf. Die Werte des Indikator THG werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „stoffliche Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei den mineralischen Gebäuden dominiert das Szenario „mehrere Szenarien“.

In Tabelle 29 ist die Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikatoren THG unterteilt nach MFH dargestellt. Im mittel zeigt das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“ einen Anteil von 47,1 % gefolgt von dem Szenario „mehrere Szenarien“ mit 30,4 %. Die weiteren Szenarien zeigen einen Anteil von unter 10 %. Die Szenarien „thermische Verwertung Verpackungsmaterialien“ und „thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsmaterialien“ weisen im Mittel Anteile von 9,5 % und 0,4 % auf. Die Werte des Indikators THG werden bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen hauptsächlich durch die Szenarien „mehrere Szenarien“ und „stoffliche Verwertung Produkt“ bestimmt. Bei dem mineralischen Gebäude dominiert das Szenario „stoffliche Verwertung Produkt“.

Tabelle 29 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator Treibhauspotenzial, MFH

Gebäude (EZFH)	**"thermische Verwertung Produkt"**	**"stoffliche Verwertung Produkt"**	**"thermische und stoffliche Verwer-**	**"thermische Verwertung Verpackungsmaterialien"**	**"thermische/stoffliche Verwertung von Produkt und Verpackungsma-**	**"mehrere Szenarien"**	**"Sonstige"**
	Treibhauspotenzial (THG)						
2.10_H_Massivholz	3,4%	21,5%	1,1%	3,7%	0,0%	70,4%	0,0%
2.7_H_Massivholz	4,5%	59,7%	3,4%	5,8%	0,1%	26,5%	0,0%
2.5_H_HTB	8,8%	26,8%	1,6%	4,9%	0,0%	57,9%	0,0%
2.9_H_HTB	1,0%	21,0%	1,3%	5,0%	0,0%	71,8%	0,0%
2.2_H_HTB	0,9%	39,8%	1,9%	11,3%	0,0%	46,1%	0,0%
2.6_H_HTB	1,0%	41,3%	1,4%	3,7%	0,0%	52,5%	0,0%
2.2_M_Stb	6,1%	66,7%	5,4%	18,9%	0,0%	3,0%	0,0%
2.6_M_Stb	4,5%	59,7%	3,4%	5,8%	0,1%	26,5%	0,0%
2.13_M_Stb	16,6%	52,5%	9,0%	11,5%	0,0%	10,4%	0,0%
2.10_M1_Porenbeton	9,0%	54,4%	6,4%	10,0%	0,1%	20,1%	0,0%
2.3_M_Porenbeton	6,1%	48,3%	11,6%	18,0%	0,2%	15,9%	0,0%
2.7_M1_Porenbeton	8,7%	47,8%	8,0%	10,0%	0,1%	25,3%	0,0%
2.4_M_KS	12,4%	50,7%	5,8%	6,8%	0,0%	24,3%	0,0%
2.12_M_KS	5,5%	46,1%	6,9%	11,7%	0,1%	29,8%	0,0%
2.9_M_KS	3,6%	45,6%	7,4%	15,3%	0,2%	28,0%	0,0%
2.10_M2_Hlz, Dämpft	9,6%	52,4%	5,7%	9,3%	3,6%	19,3%	0,0%
2.7_M2_Hlz, Dämpft	9,4%	45,9%	7,2%	9,4%	3,9%	24,2%	0,0%
2.5_M_Hlz, WDVS	11,5%	57,3%	7,4%	10,6%	0,1%	13,0%	0,0%
2.10_M3_Hlz, MW	8,4%	55,6%	6,7%	9,7%	0,1%	19,5%	0,0%
2.7_M3, Holz, BMW	8,1%	49,4%	8,3%	9,7%	0,1%	24,4%	0,0%

6.4.5 Spezifische und generische Datensätze

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben weisen die Grunddaten für die Erstellung der Gebäudeökobilanzen die nach DIN EN 15804:2014 konforme generische Datensätze (thinkstep) und EPD Datensätze (unterteilt in repräsentative Datensätze von Industrieverbänden, durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden und Hersteller-spezifische Datensätze) auf. Nachfolgend wird analysiert welchen Anteil generische Datensätze und spezifische Datensätze an Modul D der Gebäudebilanzen jeweils aufzeigen.

Werden von Produktdatensätze keine Angaben zu den Modulen C und D bereitgestellt, werden diese Datensätze, entsprechend der beschriebenen Regelung, mit generischen Entsorgungsinformationen (generischer Datensatz) verknüpft. Dieses Vorgehen ist notwendig um einen vollständigen Lebenszyklus abbilden zu können.

In der Studie „Einfluss von EPDs im DGNB System am Beispiel eines Bürogebäudes in Massivbauweise“ (Gantner 2018) wurde der Einfluss auf das Ergebnis einer Ökobilanz durch nutzen von generischen oder spezifischen Daten betrachtete. Für ein repräsentatives Bürogebäude wurden Ökobilanzen berechnet. „Die Ergebnisse der Ökobilanzen […] zeigen, dass durch die Nutzung von spezifischen EPD-Daten […] durchschnittlich […] geringere Umweltwirkungen ausgewiesen werden.“ (Gantner 2018)

In dem hier vorliegenden Kontext ist nicht die geringeren Umweltwirkungen von Bedeutung, sondern die Qualität der Information über das Bauprodukt bzw. Material. Für die Fragestellung nach der Exaktheit hinsichtlich der Recyclingpotenziale der Materialien ist ein entscheidender Aspekt die Datengrundlage. Die spezifischen Datensätze enthalten die für ein spezifisches Material die spezifischen Entsorgungsszenarien. Generische Datensätze spiegeln durchschnittlich oder repräsentative Recyclingpotenziale wieder.

Das Verhältnis der generischen zu spezifischen Datensätze aufgeteilt nach Gebäuden kann dem Anhang C (S. 119) entnommen werden. Bei allen analysierten Gebäudeökobilanzen konnte festgestellt werden, dass die Datensätze mit denen Modul D berechnet wurden zu ca. 50% aus spezifischen und ca. 50 % aus generischen Datensätze besteht. Demnach bietet die Erweiterung der Grunddaten noch ein erhöhtes Potential, bei einer Zunahme der spezifischen Daten, die Informationen bezüglich eines Recyclingpotenzials zu steigern.

7 GIS-BASIERTE DATENERFASSUNG UND VISUALISIERUNG DER MATERIAL- UND POTENZIALINFORMATIONEN AM BEISPIEL AUSGESUCHTER UNTERSUCHUNGSGEBIETE

7.1 Untersuchungsgebiete

Nachfolgend werden die drei Untersuchungsgebiete vorgestellt. Bei den Untersuchungsgebieten handelt es sich um zwei Bestandsquartiere im Stadtgebiet Bochum und ein Neubaugebiet im Stadtgebiet München. Das erste Untersuchungsgebiet liegt im Süd-Osten von Bochum im Stadtteil Querenburg. Abgegrenzt wird es von den Straßen Overbergstraße, Auf dem Aspei, Buscheyplatz und Eulenbaumstraße. Das Gebiet ist ca. 0,11 km² groß. Im Nord-Osten der Stadt Bochum im Stadtteil Kornharpen/Vo-

Abbildung 27 Untersuchungsgebiete in Bochum „Hustadt“ (links), „Flüssesiedlung“ (rechts)

ede-Abzweig liegt das zweite Untersuchungsgebiet. Das Gebiet weißt eine Größe von ca. 0,4 km² auf. Südlich grenzt das Gebiet an die Autobahn A40. In östlicher Richtung wird das Gebiet durch den Castroper Hellweg begrenzt. Die Straßen Weserstraße, Ederstraße, Aggerstraße und Ennepestraße begrenzen das Gebiet im Norden und Westen. Das Quartier wird umgangssprachlich „Flüssesiedlung“ genannt.

Ein ehemaliges Kasernengelände im Münchener Osten wird als drittes Untersuchungsgebiet herangezogen. Das Neubaugebiet ist unter dem Namen „Prinz-Eugen-Park“ bekannt. Das Gebiet hat eine Fläche von ca. 0,3 km² und es entstehen dort 2016 ca. 1800 Wohnungen. Eine Besonderheit an dem Neubauquartiert ist, dass ca. 600 der Wohnungen aus nachwachsenden Rohstoffen errichtet werden. (Landeshauptstadt München) Begrenzt wird das Gebiet durch die Straßen Salzenderweg (nördlich), Stradellastraße (östlich), Jörg-Hube-Straße (südlich) und der Cosimastraße (westlich).

Abbildung 28 Untersuchungsgebiet in München „Prinz-Eugen-Park“ (Immobilien Report München 2011)

7.2 Vorgehen

Zur Bestimmung der Gebäudestruktur in den Untersuchungsgebieten sind georeferenzierte Vektorpolygondaten, Anzahl an Stockwerken, Dachtyp, Funktion und Baujahr erforderlich. Die georeferenzierten Vektorpolygone spiegeln die Grundfläche eines Gebäudes wieder. Das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen stellt unter anderem für das Stadtgebiet Bochum ein 3-D Gebäudemodell zu Verfügung. Das 3D-Gebäudemodell wird umgangssprachlich auch als „Klötzchenmodell“ bezeichnet. Das Model steht in zwei Formaten (Level of Detail 1 (LoD1) und LoD2 (Level of Detail 2) zu Verfügung. Die Formate unterscheiden sich unter anderem durch die enthaltenen Informationen über Dachtypen.

„Als Grundlage für die Modellierung dienen die Gebäudegrundrisse aus ALKIS® und die Daten aus Airborne Laserscanning. Die mittlere Gebäudehöhe berechnet sich hauptsächlich aus den Laserscanning-Daten. Dachformen werden bei der Modellierung nicht berücksichtigt; jedes Gebäude erhält ein Flachdach. Das LoD2 (Level of Detail 2) entspricht der zweiten Ausbaustufe der 3D-Gebäudemodelle. Es handelt sich hierbei um Gebäudemodelle mit ALKIS®-konformen Standarddachformen und beschreibenden Attributen. Als Grundlage für die Modellierung dienen die Gebäudegrundrisse aus ALKIS® und Dächer aus Airborne-Laserscanning-Daten, ALKIS®-3D Gebäudeeinmessung sowie dem luftbildbasierten Digitalen Oberflächenmodell“ (Popp). In dem Gebäudemodell sind unter anderem, folgende gebäudespezifische Metadaten hinterlegt:

- storey above ground: Etagenanzahl oberhalb der Geländeoberkante
- length: Umfang des Polygons in m
- Area: Fläche des Polygons in m²
- Dachtyp: Dachtypennamen
- NrDachtypen: Beinhaltet die Dachtypennummer
- Nutzung: Nutzungstypen
- NrNutzung: steht in Verbindung zum Nutzungstypen. Jeder Nutzungstyp hat eine spezifische Nummer
- HNR: Hausnummer
- Strasse: Straßenname
- Zusatz: Hausnummernzusatz

Über die Multiplikation der Fläche des Polygons (Grundfläche) mit der Anzahl an Vollgeschossen wurde die Bruttogrundfläche pro Gebäude bestimmt. Die Daten des Gebäudemodells wurden in „ArcGIS pro“ eine Datenüberprüfung unterzogen. Zusätzlich wurden die Daten durch Begehungen und „Google Earth“ visuell auf Korrektheit geprüft und gegebenenfalls angepasst.

Für das Land Bayern stand kein frei Verfügbares 3-D Gebäudemodell zu Verfügung. Aus diesem Grund wurde das Gebäude Modell für das Untersuchungsgebiet in der Stadt München in „ArcGIS pro“ digitalisiert.

Um die gebäudespezifischen Kennwerte strukturiert in das GIS-System zu implementieren wurde je Untersuchungsgebiet ein Datenkatalog erstellt. Die Identifikationsnummer (ID) stellt die eindeutige Identifizierung jedes Gebäudes sicher. Die Bestimmung der Baujahre der Bestandsgebäude in den Untersuchungsgebieten ist für das weitere Vorgehen von wesentlicher Bedeutung. Das Baujahr ist der Faktor, auf dem die Zuweisungen der gebäudespezifischen Kennwerte basiert. Die im Datenkatalog erfasste optische Erscheinung der Gebäude in den Untersuchungsgebieten wurde mit den nachstehend beschriebenen Strukturmerkmalen der Bauchepochen nach (Loga et al. 2015) gegenübergestellt und dementsprechend die Baujahre ermittelt. Basierend auf den bestimmten Baujahren war die Möglichkeit gegeben alle gebäudespezifischen Kennwerte den Gebäuden in den Untersuchungsgebieten beizuordnen (Özdemir et al. 2017). Die Systematik der Vorgehensweise ist in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29 Strategisches Vorgehen bei der Ermittlung von spezifischen Kennwerten (vergl. Abbildung 1).

7.3 Ergebnisse

Durch die räumliche Analyse im GIS-System konnten die Gebäudestruktur, Energiekennwerte, Materialintensitäten, potenzielle Schadstoffbelastung für die Untersuchungsgebiete „Hustadt“ und „Flüssesiedlung“ bestimmt werden. Für das Untersuchungsgebiet „München“ konnten zusätzlich zu den Materialintensitäten die Recyclingpotenziale bestimmt werden. Die Bestimmung der Recyclingpotenziale ist möglich da es sich um ein vollständiges Neubaugebiet handelt. Dementsprechend können die in Kapitel 6 analysierten Recyclingpotenziale auf Gebäudeebene auf das Untersuchungsgebiet übertragen werden.

7.3.1 Gebäudestruktur

Der Gebäudebestand des Untersuchungsgebietes „Hustadt“ ist in Abbildung 30 dargestellt. Das Gebiet zeigt eine durchmischte Gebäudetypologie mit EFH sowie mit RH und auch MFH. Die dominierende Bauepoche der im Gebiet vorhandenen Gebäude liegt bei 1958 – 1968. Innerhalb des Gebietes stehen 179 Wohngebäude.

Der Gebäudebestand des Untersuchungsgebietes „Flüssesiedlung“ ist in Abbildung 31 dargestellt. Das Gebiet zeigt eine durchmischte Gebäudetypologie. Das Gebiet wird deutlich von Gebäuden aus der Bauepoche 1958 – 1968 dominiert. Die Anzahl der Wohngebäude liegt im Untersuchungsgebiet “Flüssesiedlung“ bei 584.

Bei dem Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ handelt es sich um ein Neubaugebiet. Dementsprechend liegt eine homogene Struktur von Neubauten vor. Es handelt sich um EFH, RH und MFH. Insgesamt sind 187 Gebäude vorhanden.

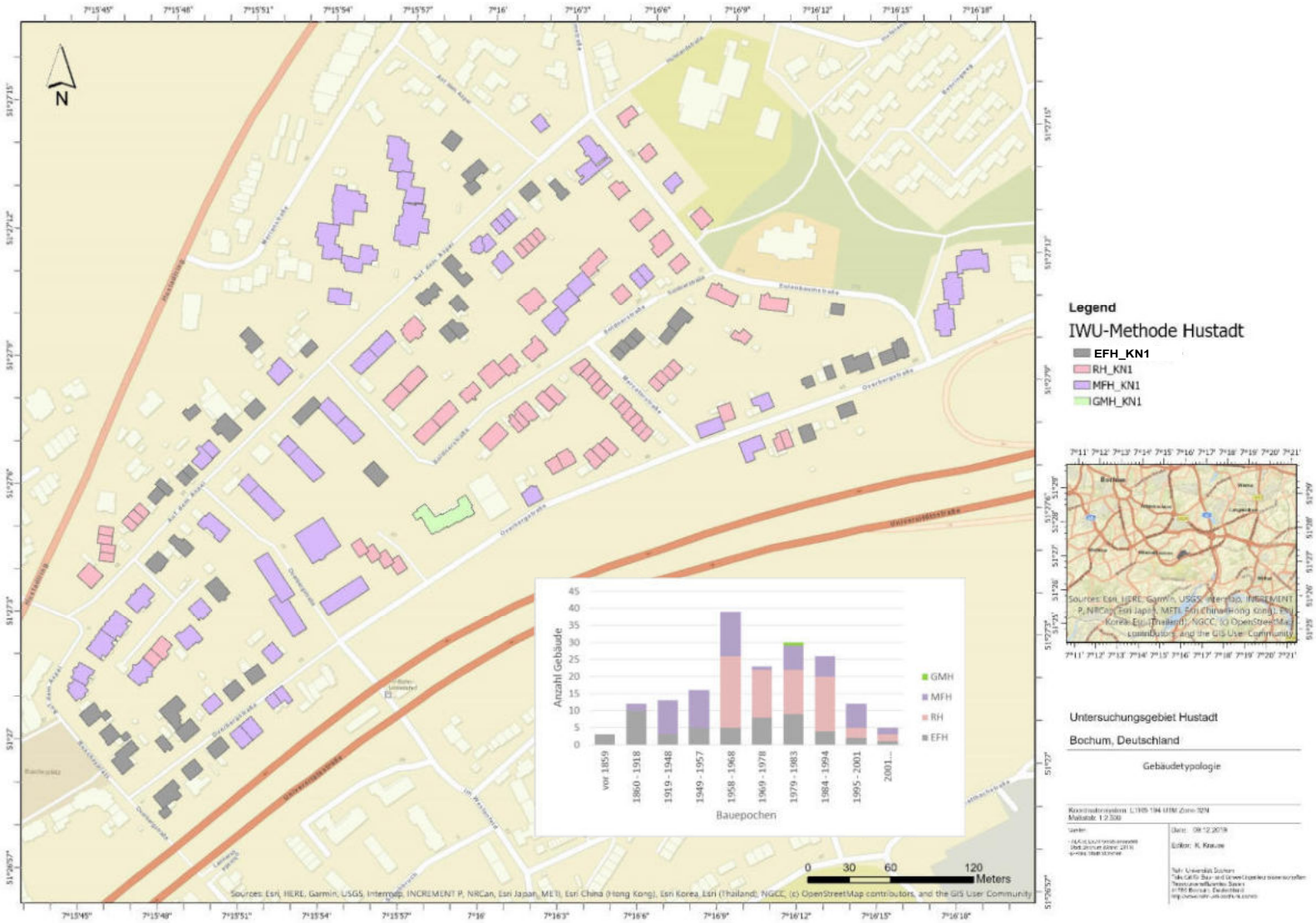


Abbildung 30 Gebäudetypologie „Hustadt“ (s. auch Anhang D)

Abbildung 31 Gebäudetypologie „Flüssesiedlung“ (s. auch Anhang D)

7.3.2 Materialintensitäten

Hustadt, Bochum

In Abbildung 32 ist die räumliche Verteilung der Materialintensität nach der IÖR-Methode am Beispiel von Beton in dem Untersuchungsgebiet „Hustadt“ dargestellt. Insgesamt ist im Untersuchungsgebiet ein Gesamtgewicht von 49.888 t an Beton verbaut. Das höchste Betonaufkommen mit ca. 20.000 t zeigt ein Gebäude aus der Bauepoche 1958-1968 auf, welches zum Gebäudetyp MFH zählt. Die räumlichen Verteilungen der Materialintensitäten der Materialtypen (Putz/Estrich/Mörtel, Mauersteine, Bauplatten, Holz/Holzwerkstoffe, Wärmedämmstoffe, Dachdeckungen, Beläge/Dichtungsbahnen, Sonstige Stoffe/Schüttung, Metalle) nach der IÖR-Methode sind im Anhang D (S. 127 ff.) dargestellt. Die Verteilung der Materialtypen im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 32 dargestellt. Mit 48% dominiert der Wert für Beton gefolgt von 22% Anteil an Mauersteine und 19% Anteil für Putz/Mörtel/Estrich. Die anderen Materialgruppen weisen einen Anteil von unter 5 % auf. Das Gesamtgewicht des Untersuchungsgebiets „Hustadt“ beläuft sich auf 103.000 t an verbautem Material basierend auf den Kennwerten nach IWU-Methode.

Die Materialintensität nach der ARK-Methode ist in Abbildung 33 beispielhaft für das Material Zement dargestellt. Die räumlichen Verteilungen für die Materialien Kies/Sand, Mergel/Ton und Holz sind im Anhang D (S. 122 ff.) dargestellt. Nach der ARK-Methode ergibt sich für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“ ein Gesamtaufkommen von ca. 8000 t Zement. Die Verteilung der Materialtypen im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 33 dargestellt. Mit 70% dominiert der Wert für Kies/Sand gefolgt von 15% Anteil an Mergel/Ton. Die anderen Materialgruppen weisen einen Anteil von unter 10 % auf. Das Gesamtgewicht der Gebäude des Untersuchungsgebiets „Hustadt“ beläuft sich auf 93.000 t an verbautem Material basierend auf den Kennwerten nach ARK-Methode.

Flüssesiedlung, Bochum

In Abbildung 34 ist die räumliche Verteilung der Materialintensität nach der IÖR-Methode am Beispiel von Beton in dem Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ dargestellt. Insgesamt ist im Untersuchungsgebiet ein Gesamtgewicht von 94.710 t an Beton verbaut. Das höchste Betonaufkommen mit 2.383 t weißt ein Gebäude aus der Bauepoche 1958-1968 auf, welches zum Gebäudetyp MFH zählt. Die räumlichen Verteilungen der Materialintensitäten der Materialtypen (Putz/Estrich/Mörtel, Mauersteine Bauplatten, Holz/Holzwerkstoffe, Wärmedämmstoffe, Dachdeckungen, Beläge/Dichtungsbahnen, Sonstige Stoffe/Schüttung, Metalle) nach der IÖR-Methode sind im Anhang D (S. 142 ff.) dargestellt. Die Verteilung der Materialtypen im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 34 dargestellt. Mit 47% dominiert der Wert für Beton gefolgt von 23% Anteil an Mauersteinen und 20% Anteil für Putz/Mörtel/Estrich. Die anderen Materialgruppen weisen einen Anteil von unter 5% auf. Das Gesamtgewicht der Gebäude des Untersuchungsgebiets „Flüssesiedlung“ beläuft sich auf 212.865 t verbauten Material basierend auf den Kennwerten nach IÖR-Methode. Die Materialintensität nach der ARK-Methode ist in Abbildung 35 beispielhaft für das Material Zement dargestellt. Die räumlichen Verteilungen für die Materialien Kies/Sand, Mergel/Ton und Holz sind im Anhang D (S. 137 ff.) dargestellt. Nach der ARK-Methode ergibt sich für die Gebäude des Untersuchungsgebiets „Flüssesiedlung“ ein Gesamtaufkommen von ca. 8000 t Zement. Die Verteilung der Materialtypen im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 35 dargestellt. Mit 70% dominiert der Wert für Kies/Sand gefolgt von 14% Anteil an Mergel/Ton. Die anderen Materialgruppen weisen einen Anteil von 10 % und weniger auf. Das Gesamtgewicht der Gebäude des Untersuchungsgebiets „Flüssesiedlung“ beläuft sich auf 239.368 t an verbautem Material basierend auf den Kennwerten nach ARK-Methode.

Prinz-Eugen-Park, München

In Abbildung 36 ist die räumliche Verteilung der Materialintensität für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ am Beispiel von „Mineralische Baumaterialien“ dargestellt. Im Untersuchungsgebiet ist ein Gesamtgewicht von 195.007 t an „Mineralische Baumaterialien“ verbaut. Das höchste Aufkommen an „Mineralische Materialien“ mit 17.513 t weist das gleichzeitig größte MFH mit einer BGF von 14.400 m² auf. Die räumlichen Verteilungen der Materialintensitäten der Materialtypen (Pflanzliches Baumaterial, Metall, Kunststoffe, Bodenbeläge, Dämmstoffe, Putz, Beschichtungen, Technischer Ausbau, Transluzente Bauteile) sind im Anhang D (S. 153 ff.) dargestellt. Die prozentuale Verteilung der Materialtypen im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 36 dargestellt. Mit 77% dominiert der Wert für „Mineralische Baumaterialien“ gefolgt von 7% Anteil an „Bodenbelägen, Estrich“ und 6% Anteil für „Putz“. Die anderen Materialgruppen zeigen einen Anteil von unter 4 % auf. Das Gesamtgewicht der Gebäude des Untersuchungsgebiets „Prinz-Eugen-Park“ beläuft sich auf 252.274 t an verbautem Material basierend auf den Kennwerten der Gebäudeökobilanzierung.

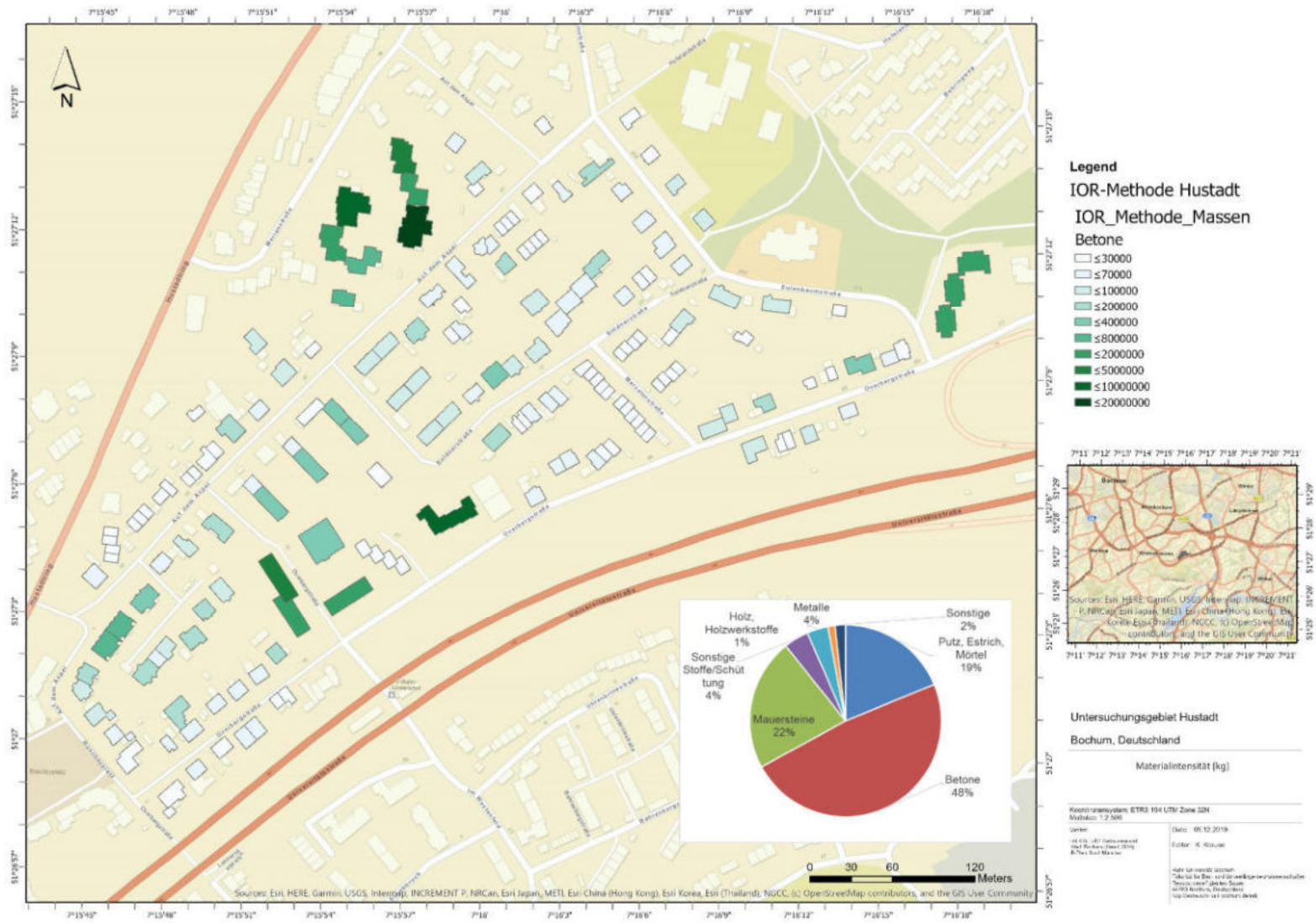


Abbildung 32 Räumliche Verteilung von Beton sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ (s. auch Anhang D)

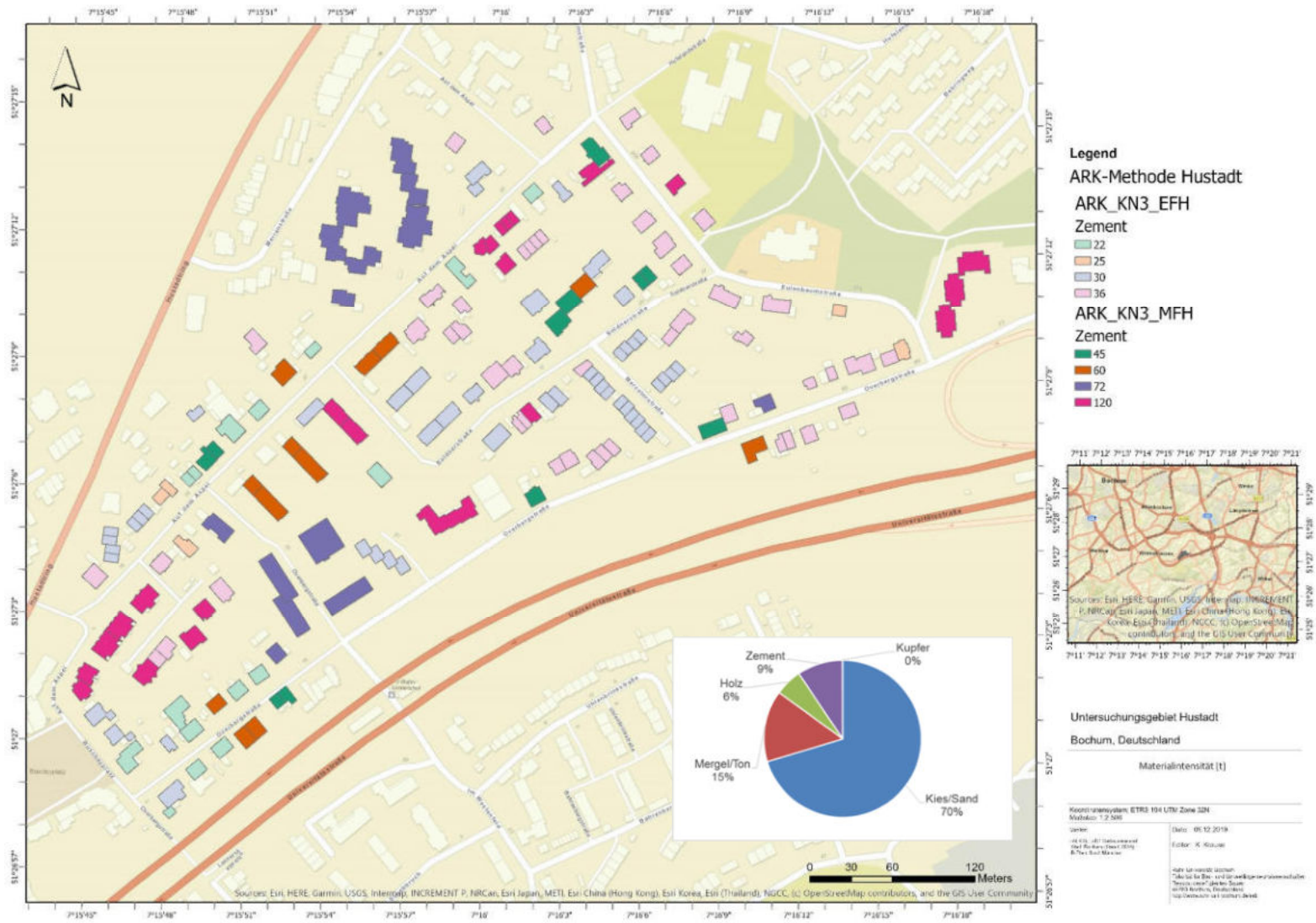


Abbildung 33 Räumliche Verteilung von Zement sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ (s. auch Anhang D)

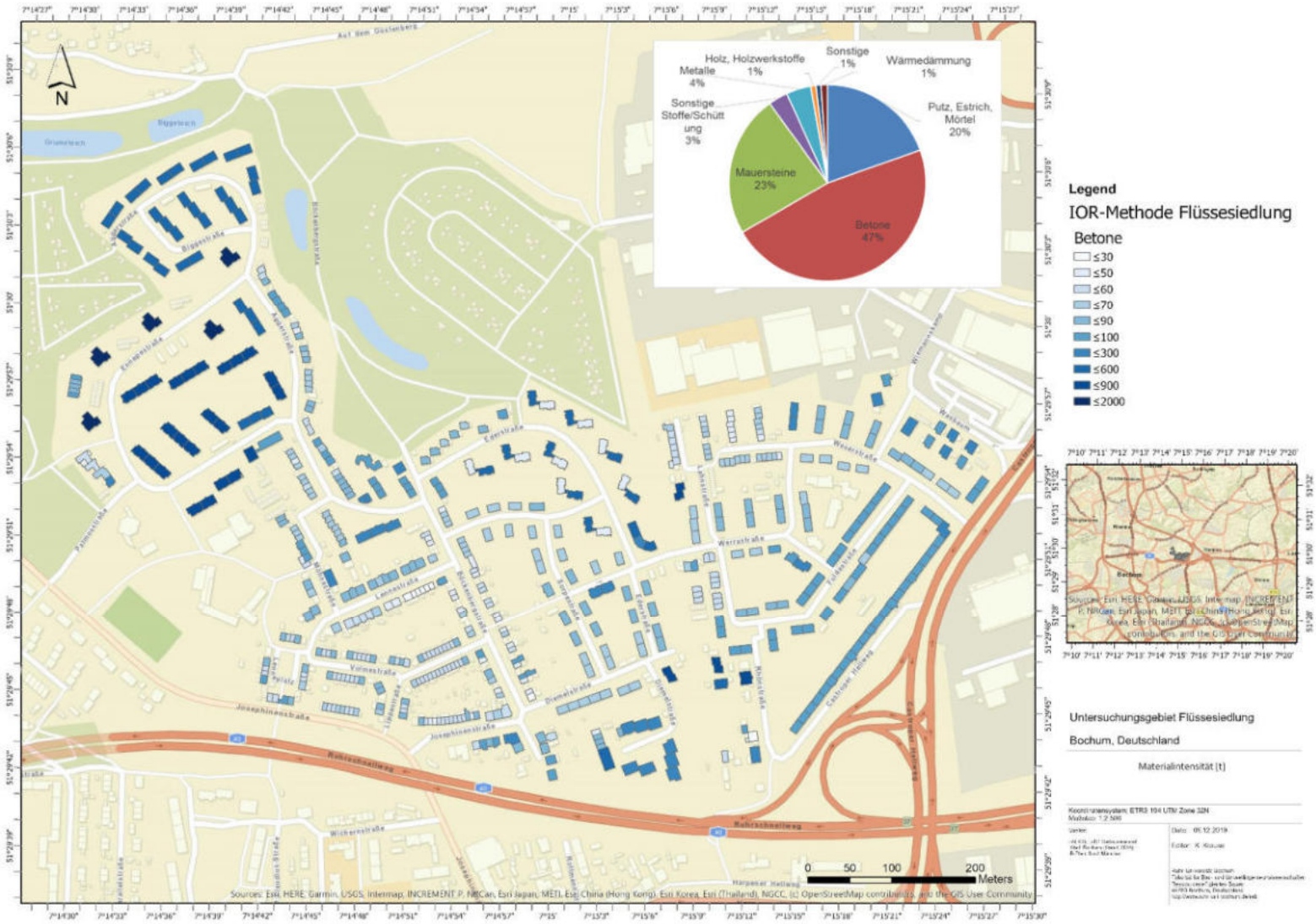


Abbildung 34 Räumliche Verteilung von Beton sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ (s. auch Anhang D)

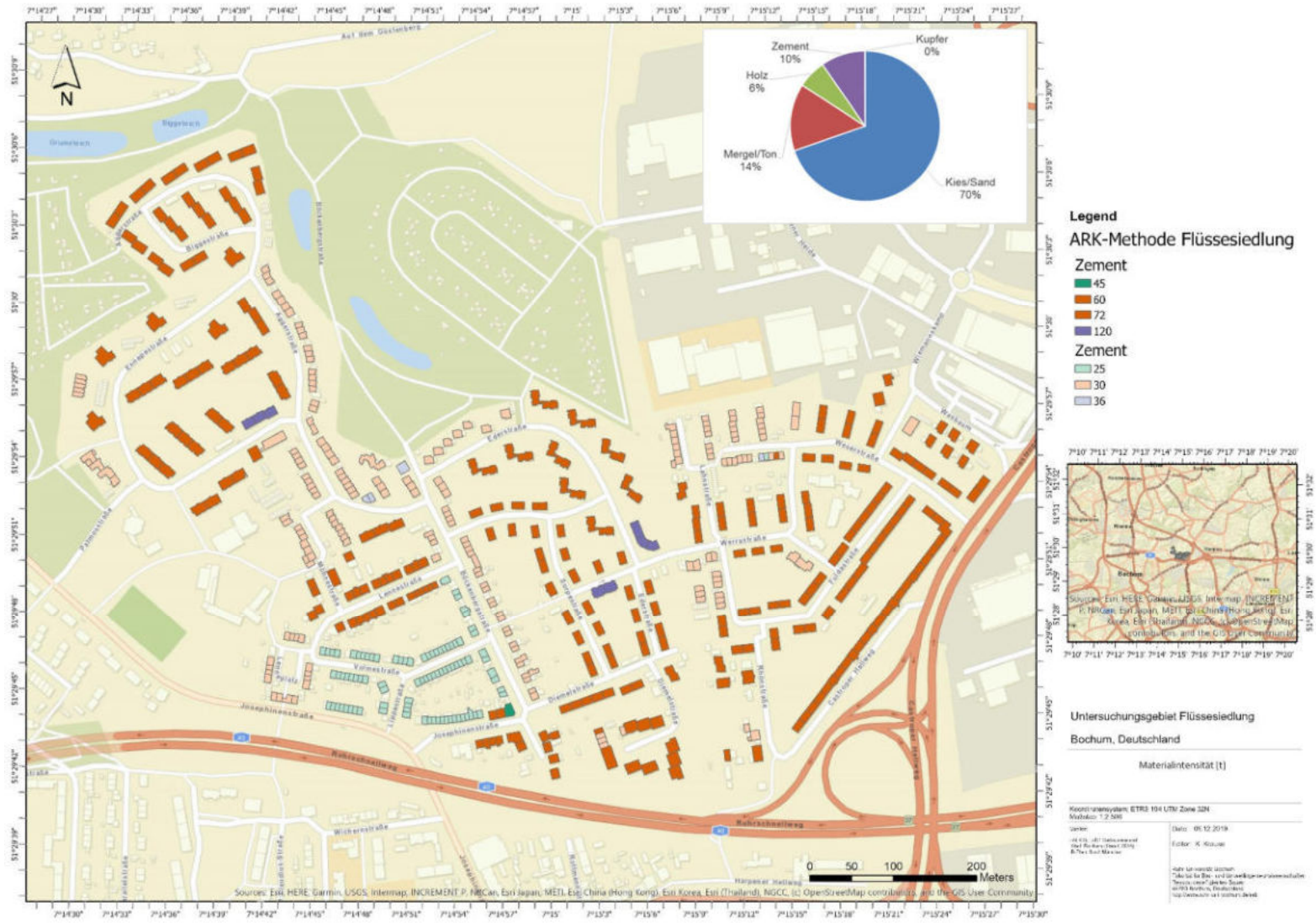


Abbildung 35 Räumliche Verteilung von Zement sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ (s. auch Anhang D)

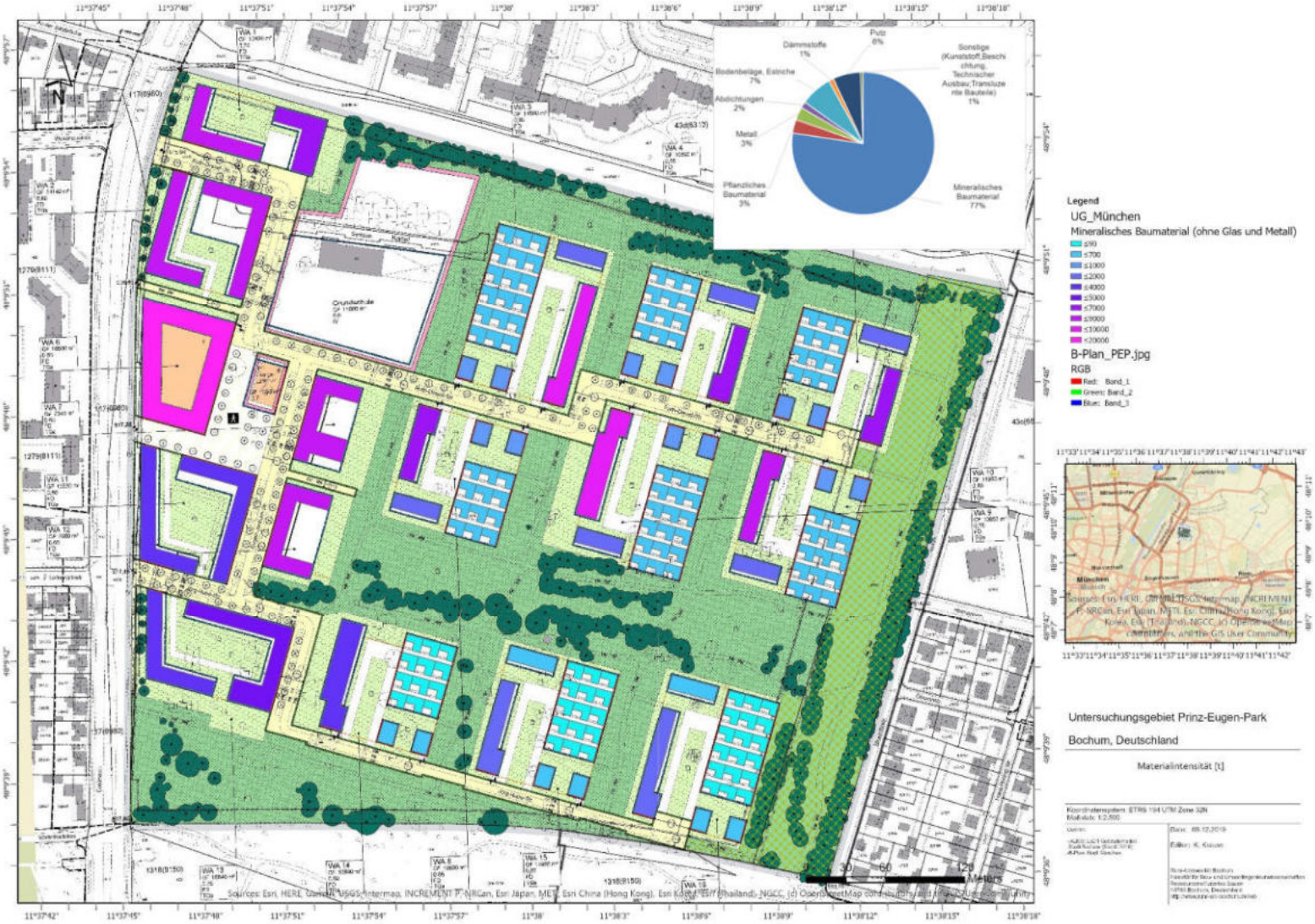


Abbildung 36 Räumliche Verteilung für Mineralische Baumaterialien sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ (s. auch Anhang D)

7.3.3 Potenzielle Schadstoffbelastung

In den 3D-Gebäudemodellen waren keine Hinweise bzw. Informationen über verbaute und ggf. schadstoffbelastete Materialien vorhanden. Für die Implementierung der Informationen über eine potenzielle Schadstoffbelastung wurde auf die in Kapitel 5.5 erarbeitete Verteilung der Schadstoffe in Abhängigkeit von der Baualtersklasse zurückgegriffen (vergl. Abbildung 13) und in das System übertragen. Die potenzielle Schadstoffbelastung wird nachfolgend am Beispiel des Gebäudeschadstoffs Asbest dargestellt. Die Implementierung der Gebäudeschadstoffe KMF, Holzschutzmittel (HSM), PCB, PAK und Formaldehyd erfolgte analog. Dem Anhang E (S. 163 ff.) dieser Arbeit sind die Ergebnisdarstellungen für die restlichen Gebäudeschadstoffe zu entnehmen. Durch die festgelegten Gewichtungen wird deutlich, dass insbesondere Asbest, Holzschutzmittel, PCB und Formaldehyd in den Baualtersklassen D bis F dominieren. Die räumliche Verteilung der potenziellen Schadstoffbelastung am Beispiel von Asbest ist in Abbildung 37 („Hustadt“) und Abbildung 38 („Flüssesiedlung“) dargestellt.

Hustadt

Im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ zeigen 79 der 176 Gebäude eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, dass eine Asbestbelastung vorliegt oder im Gebäude asbesthaltige Materialien verbaut sind. Diese Gebäude sind überwiegend der Bauepoche 1958 – 1968 zugeordnet.

69 Gebäude, hauptsächlich aus den Bauepochen 1979 – 1983 u. 1984 – 1994, liegen im Bereich der mittleren Wahrscheinlichkeit und bei 17 Gebäuden (1995- 2001 u. jünger) kann davon ausgegangen werden, dass keine Belastung vorliegt.

Flüssesiedlung

Im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ zeigen 459 der 583 Gebäude eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, dass eine Asbestbelastung vorliegt oder im Gebäude asbesthaltige Materialien verbaut sind. Diese Gebäude sind überwiegend der Bauepoche 1949 – 1957 zugeordnet.

112 Gebäude, hauptsächlich aus der Bauepochen hauptsächlich aus der Bauepoche 1919 – 1948, liegen im Bereich der mittleren Wahrscheinlichkeit und bei 11 Gebäuden (1995- 2001 u. jünger) kann davon ausgegangen werden, dass keine Belastung vorliegt.

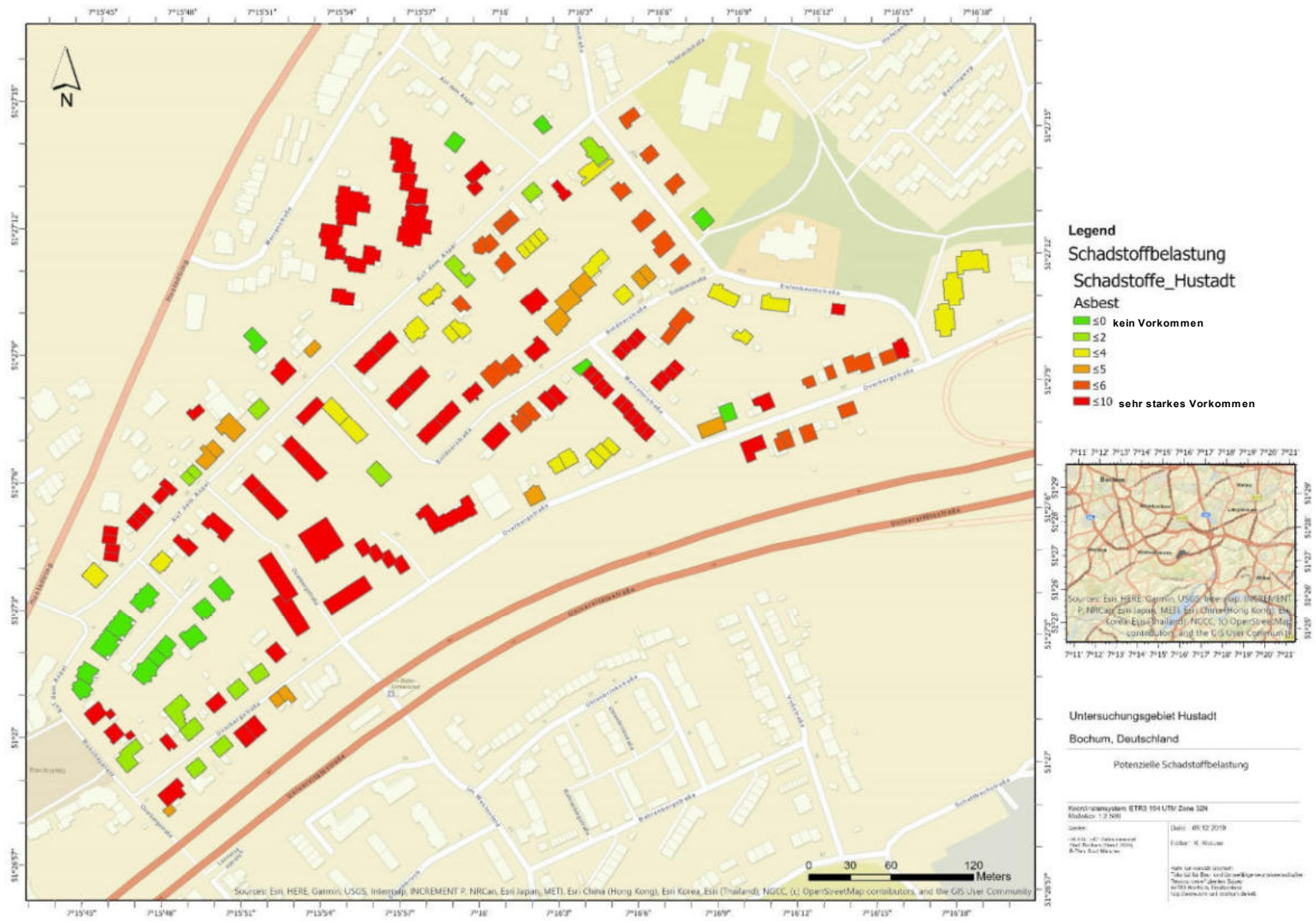


Abbildung 37 Vorkommen von potenziell asbesthaltigen Materialien im Untersuchungsgebiet „Husatdt“ (s. auch Anhang E)

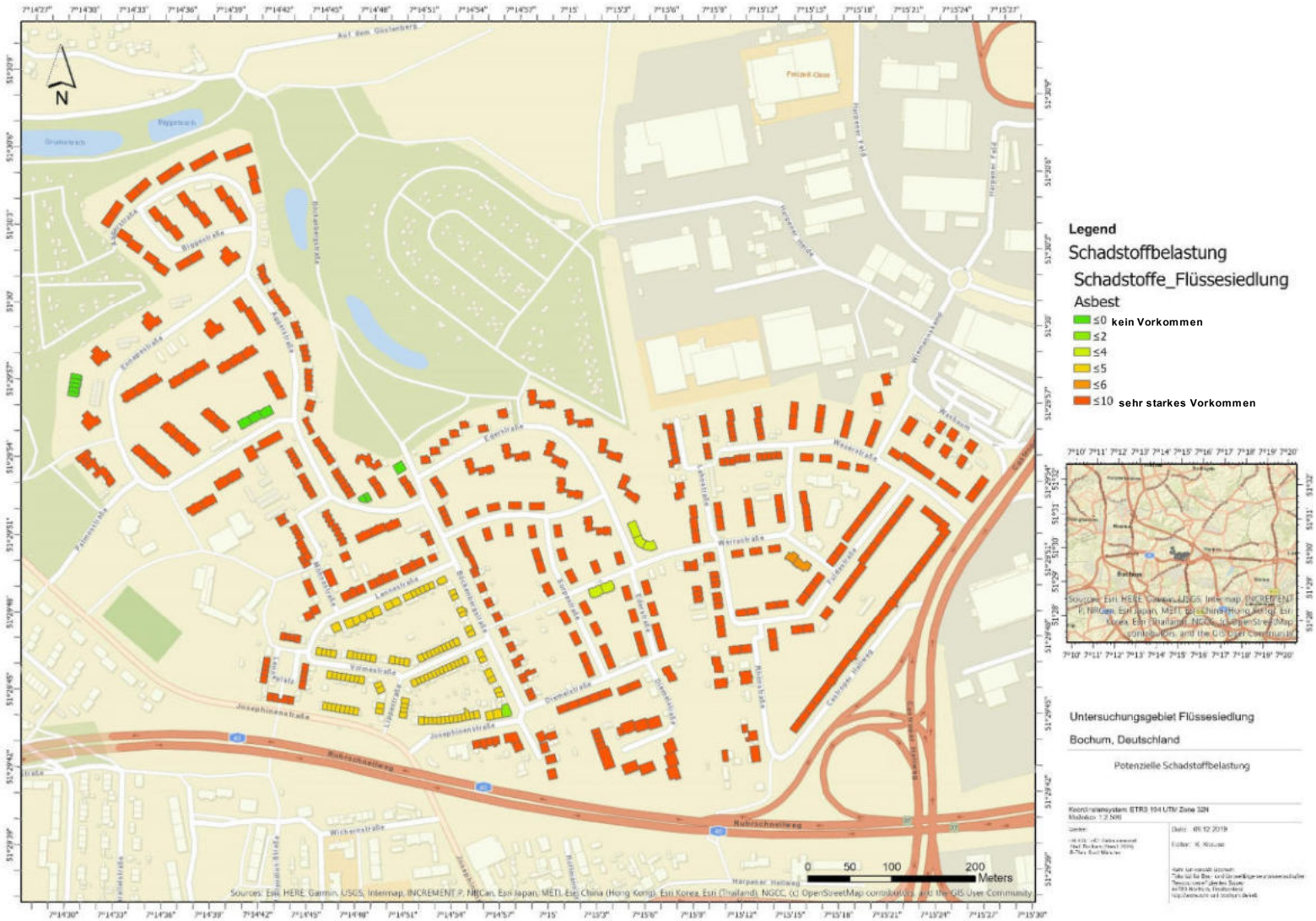


Abbildung 38 Vorkommen von potenziell asbesthaltigen Materialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ (s. auch Anhang E)

7.3.4 Recyclingpotenziale

Die räumliche Verteilung für das Recyclingpotenzial des Untersuchungsgebiets „Prinz-Eugen-Park“ ist in Abbildung 42 beispielhaft für den Indikator THG dargestellt. Die Implementierung der Indikatoren PENRE, PERE und THG erfolgt über die in Kapitel 6.4 erarbeiteten Potenziale in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Konstruktionstyp.

Das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ weist insgesamt ein Recyclingpotenzial von -36.593 t CO_2-äq THG auf. Im Mittel sind das -79,7 kg CO_2-äq/m² BGF.

In Abbildung 39 ist das Recyclingpotenzial des Indikators THG nach Materialtypen dargestellt. Das Recyclingpotenzial im Untersuchungsgebiet, bezogen auf den Indikator THG wird mit -16.276 t CO_2-äq THG dominiert von der Materialkategorie „Holz“. Mit -13.892 t CO_2-äq THG weist die Materialkategorie den zweit höchsten Anteil auf.

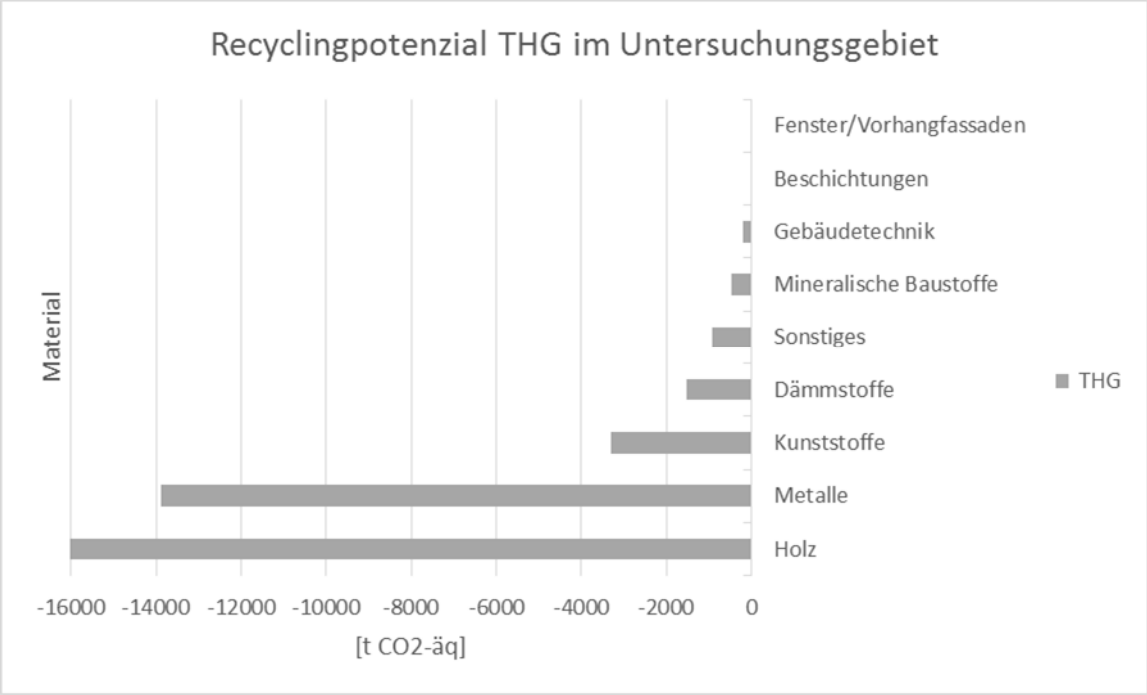


Abbildung 39 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator THG für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“

Bezogen auf den Indikator PERE zeigt das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ insgesamt ein Recyclingpotenzial von -38.553 GJ PERE auf. Im Mittel sind das -195,3 MJ/m² BGF.

Abbildung 40 zeigt das Recyclingpotenzial des Indikators PERE nach Materialtypen unterteilt. Das Recyclingpotenzial im Untersuchungsgebiet bezogen auf den Indikator PERE wird mit -15.778 GJ dominiert von der Materialkategorie „Holz“ gefolgt von -10.120 GJ der Materialkategorie Metall.

Bezogen auf den Indikator PENRE zeigt das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ insgesamt ein Recyclingpotenzial von -281.139,1 GJ PENRE auf. Im Mittel sind das -1293,0 MJ/m² BGF.

Abbildung 41 zeigt das Recyclingpotenzial des Indikators THG nach Materialtypen unterteilt. Das Recyclingpotenzial im Untersuchungsgebiet bezogen auf den Indikator PERE wird mit -160.180 GJ dominiert von der Materialkategorie „Holz“ gefolgt von -73.353 GJ der Materialkategorie Metall.

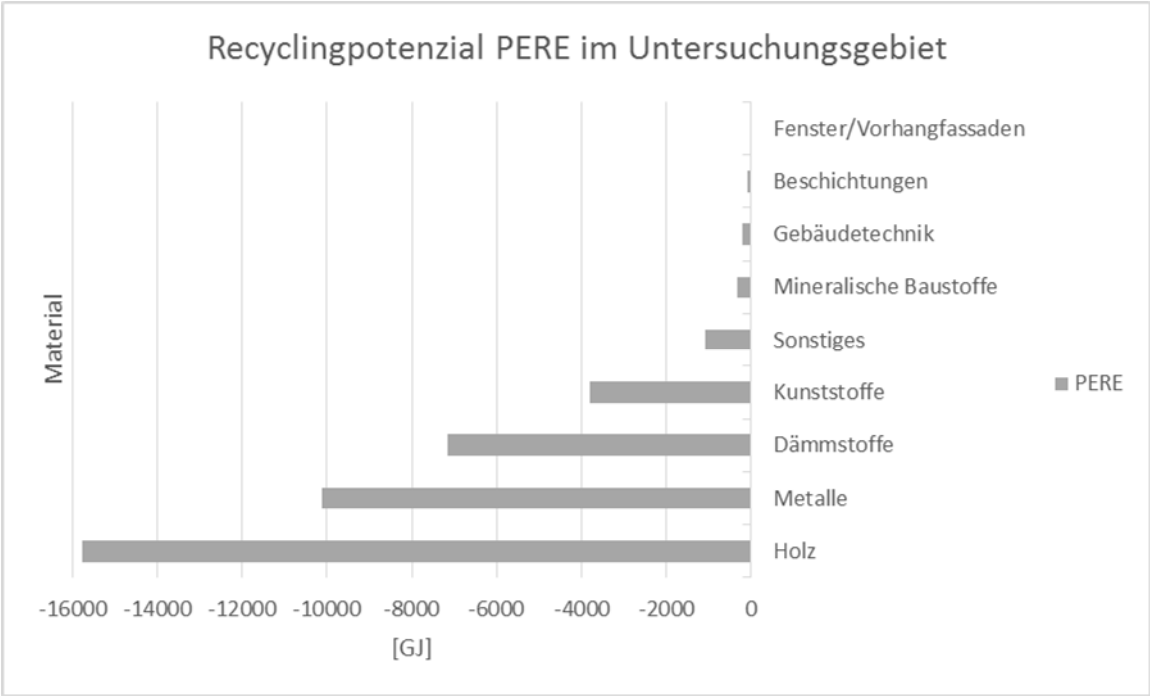


Abbildung 40 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator PERE für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“

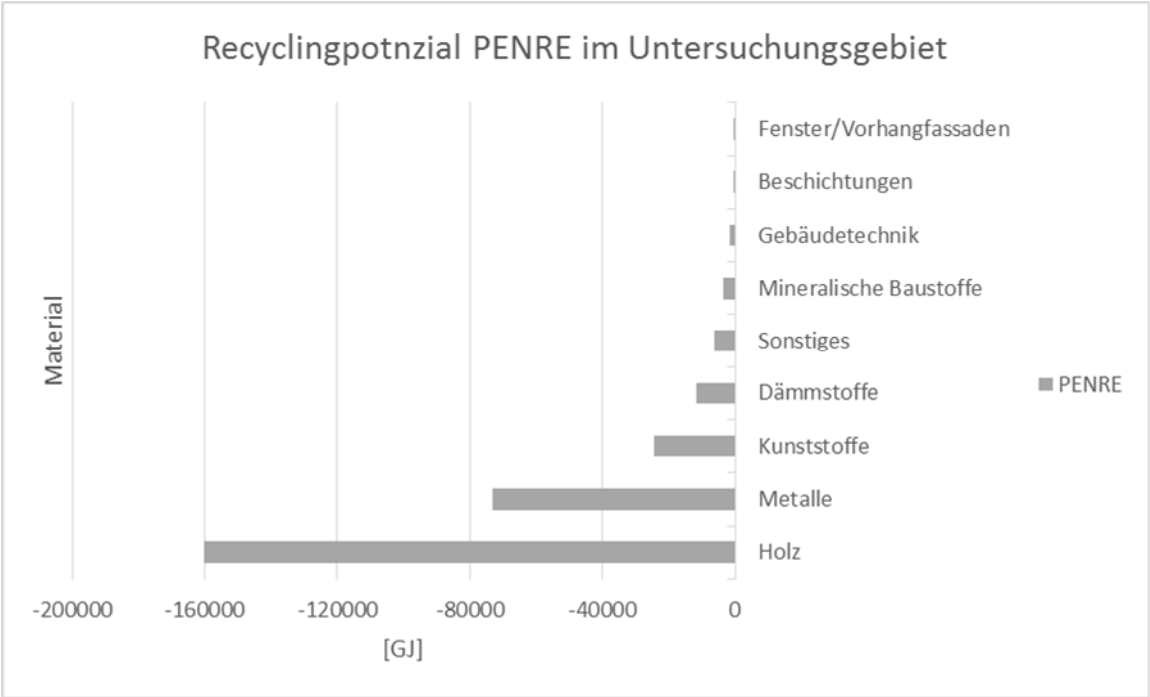


Abbildung 41 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator PENRE für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“

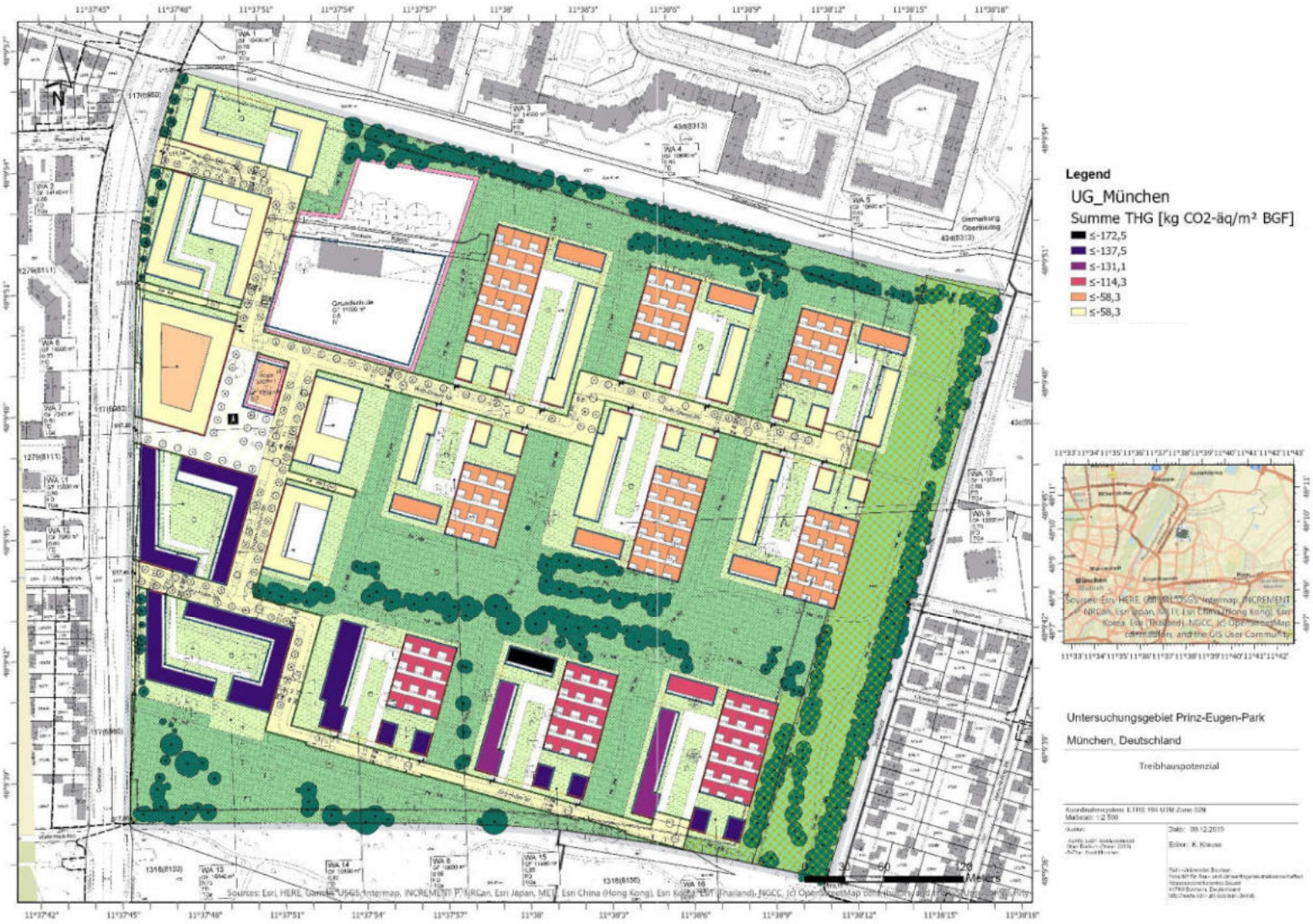


Abbildung 42 Recyclingpotenzial für den Indikator THG, „Prinz-Eugen-Park“ (s. auch Anhang F)

7.4 Auswertung

Das ermittelte Gesamtgewicht des Materialbestandes des Untersuchungsgebiets „Hustadt“ beläuft sich auf 103.000 t. Der Baustoff Beton weißt mit 48% den größten Anteil des gesamten Gewichts des Wohnbestandes auf. Mit 22% und 19% folgen die Baustoffgruppen Mauerstein und Putz, Estrich bzw. Mörtel. Einen geringen Prozentsatz von weniger als 5% des Materialpotenzials ergeben die Gruppierungen Bauplatten, Beläge, Dichtungsbahnen, Dachdeckungen sowie. Holz und Holzwerkstoffe und Wärmedämmstoffe. Diese Verhältnisse lassen sich die der entsprechend höheren Dichte von Beton gegenüber den anderen Materialien erklären.

Die den Berechnungen im Untersuchungsgebiet zugrundeliegenden spezifischen Materialkennwerte der Stoffintensitäten nach (Gruhler et al. 2002) liegen im Mittel bei 1,20 t/m² BGF für EFH sowie 1,23 t/m² BGF für MFH.

Im Weiteren zeigen die spezifischen Materialkennwerte der Stoffintensität nach (Lichtensteiger 2006) durchschnittliche Werte von 0,38 t/m³ BRI für MFH und 0,45 t/m³ BRI für EFH. Der spezifische Materialkennwert liegt in diesem Fall nur in Form des charakteristischen Gesamtvolumens vor und wurde so für die Berechnungen im Untersuchungsgebiet zugrunde gelegt. Insgesamt ermittelt sich danach ein Gesamt- Materialpotenzial von 93.000 t im Untersuchungsgebiet „Hustadt“. Hierbei bilden die Materialien Kies und Sand mit 70% den größten Anteil. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass diese Stoffe Bestandteile von Beton sind. Es folgen die Materialtypen Mergel, Ton mit knapp 15% und Zement mit 9% als weitere mineralische Baustoffe. Der Anteil an pflanzlichen Materialien in Form von Holz liegt bei 6% an der Gesamtmasse. Die Masse von Kupfer macht für das Untersuchungsgebiet weniger als 1,0% der Gesamtmasse aus.

Darauf aufbauend wurde eine Übertragung des Vorgangs der strategischen Ermittlung der Materialpotenziale auf ein zweites Untersuchungsgebiet durchgeführt. Das Gesamtgewicht des Untersuchungsgebiets „Flüssesiedlung“ beläuft sich auf 212.865 t der im Gebiet vorhandenen Wohngebäude. 47% macht der Wert für Beton am Gesamtmaterialaufkommen aus. Die weitern mineralischen Materialien zeigen einen Anteil von 23% (Mauersteine) und 20% Anteil für Putz/Mörtel/Estrich. Die anderen Materialgruppen weisen einen Anteil von unter 5 % auf.

Das ermittelte Materialpotenzial nach (Lichtensteiger 2006) für das Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ ergibt ein Gesamtwert von 239.368 t. Dieser Wert wird großenteils durch die 70% (Kies u. Sand) und 14% (Ton u. Mergel) bestimmt.

Die Gegenüberstellung der Berechnungen der Materialpotenziale zeigt eine Differenz im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ von 10.000 t und im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ von 26.503 t. Wobei im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ die Gesamtmasse nach (Gruhler et al. 2002) und im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ die Gesamtmasse der Materialkennwerte nach (Lichtensteiger) die größeren Materialpotenziale ergeben. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, dass die Materialkennwerte nach (Gruhler et al. 2002) vergleichbare Ergebnisse liefern wie die Berechnungen von Materialkennwerten real existierender Gebäude (s. Kapitel 4.3.).

Eine Materialpotenzialanalyse in Bezug auf Bestandsgebäude kann nicht ohne Berücksichtigung von Gebäudeschadstoffen durchgeführt werden. Die räumliche Verteilung der potenziellen Schadstoffbelastung am Beispiel von Asbest ergab für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“, dass 84% der Gebäude potenziell belastet sind. Davon weisen 45% der Gebäude eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit der Belastung mit Asbest oder Asbestprodukten auf. Im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ sind 98% der Gebäude potenziell mit Asbest belastet. Davon weisen 79% der Gebäude eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit der Schadstoffbelastung auf. Zu berücksichtigen ist in diesem Kontext, dass die potenziellen Belastungen auf Basis charakteristischen Anwendungszeiträumen der Schadstoffe sowie rechtlichen Grundlagen ermittelt wurde. Unberücksichtigt blieben dabei bereits durchgeführte Sanierungsarbeiten, wodurch potenziell Schadstoffbelastungen verringert wurden.

Das ermittelte Gesamtgewicht des Materialbestandes des Untersuchungsgebiets „Prinz-Eugen-Park“ beläuft sich auf 252.274 t. Der Baustoff Beton weißt mit 77% den dominierenden Anteil des gesamten Gewichts des Wohnbestandes auf. Alle weiteren Materialgruppen haben einen Anteil von weniger als 10% an der Gesamtmasse im Untersuchungsgebiet. Dabei handelt es sich um ein Neubaugebiet, was

die Bestimmung der Materialpotenziale auf Basis von Gebäudeökobilanzen, gestattete. Die hier verwendeten Gebäudeökobilanzen sind Teil einer am Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen vorhandenen Datenbank. Diese lieferten gebäudespezifische Materialkennwerte für die Stoffintensitäten bezogen auf Neubauten. Die mittlere Materialintensität für EZFH beläuft sich auf 1,19 t/m² und 1,23 für MFH.

Darauf aufbauend wurde die Gebäudeökobilanzierung nicht nur für die Ermittlung der Stoffintensitäten genutzt. Zusätzlich ist auf Basis des Lebenszyklusmoduls D das Recyclingpotenzial analysiert worden, wobei aktuell noch spezifische Ungenauigkeiten hinsichtlich der hinterlegten Entsorgungsszenarien zu berücksichtigen sind.

Insgesamt ergab sich für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ ein Recyclingpotenzial von -36.593 t CO_2-äq THG, -38.553 GJ PERE sowie -281.139,1 GJ PENRE in Form von substituierten Umweltauswirkungen bzw. Primärenergie durch Sekundärmaterialien oder Brennstoffen.

7.5 Potenzielle weitere Anwendungsgebiet

Die Anwendung des GIS-Systems wurde in dem hier vorliegenden Kontext hauptsächlich im Hinblick auf die Ermittlung und Analyse der in Wohngebäuden vorhandenen Materialmassen und Potenziale eingesetzt. Darüber hinaus ergeben sich weitaus mehr Anwendungsmöglichkeiten.

Eine direkte Erweiterung des hier vorgestellten Verfahrens ist die Überlagerung der Indikatoren spezifische Materialintensitäten der Bestandsbebauung mit der potenziellen Schadstoffbelastung. Es kann ermittelt werden, wie hoch der Verlust an Sekundärmaterial aufgrund einer Schadstoffbelastung ist. Die Informationen über potenzielle Schadstoffbelastung kann zu Grunde gelegt werden, um im Vorfeld von Sanierungsmaßnahmen, wirtschaftliche Betrachtungen durchzuführen.

Die Bestandsgebäude können als weiter Nutzungsmöglichkeit um Einsparpotenziale durch Sanierungsmaßnahmen ergänzt werden. Im Anhang F (S. 175 ff.) ist das potenzielle Einsparpotenzial für die Untersuchungsgebiete „Hustadt“ und „Flussesiedlung“ basierend auf zwei Varianten von Sanierungspaketen dargestellt. Sanierungspaket M1 „konventionell“ orientiert sich an praktisch umsetzbaren Maßnahmen, die etwa den Vorgaben der EnEV 2009 entsprechen. Das Szenario M2 „zukunftsweisend“ orientiert sich an technisch realisierbaren Maßnahmen und orientiert sich an Standards eines Passivhauses. Unter den energetischen Maßnahmen werden bauliche Veränderungen wie z.B. die Dämmung von Außenwänden aber auch die Sanierung der Anlagensysteme verstanden. (Loga et al. 2015) So kann die Differenz der Energiekennwerte für die Indikatoren Primärenergie und CO_2-Emissionen der beiden Szenarios zum „Ist-Zustand“ berechnet werden und die Einsparpotenziale bestimmt werden. Dementsprechend können die Gebäude mit hohem Sanierungsbedarf charakterisiert bzw. das größte Einsparpotenzial visualisiert werden. Bei der Kombination dieser Aspekte mit den Materialintensitäten können durch die Sanierungsmaßnahmen freiwerdende Materialmengen die als potenzielle Sekundärressourcen nutzbar sind ermittelt werden, was wiederum aus wirtschaftlicher Sicht interessant ist um z.B. Sanierungsmaßnahmen wirtschaftlicher zu gestallten.

Die Analyse der im Gebäude gelagerten Stoffe in Kombination mit den in der Bauwirtschaft nachgefragten Ressourcen, wie z.B. Sand, kann ein weiteres Anwendungsfeld sein. Demnach können aus ökonomischer Sicht die Materialintensitäten einzelner Gebäude charakterisiert werden. Je nach industrieller Entwicklung ist auch denkbar, dass aktuell nicht relevante Materialmengen bzw. Stoffe in Zukunft von großem Interesse werden und deren Identifizierung an Bedeutung gewinnen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die gebaute Umwelt beinhaltet eine beachtenswerte Masse an Materialien und stellt eine potentielle zukünftige Quelle für verschiedene Sekundärressourcen dar. Demzufolge sind detaillierte Informationen über die Materialzusammensetzung von Gebäuden notwendig, um das Ressourcenpotenzial des Gebäudebestandes auf unterschiedlichen Ebenen zu bestimmen und später nutzbar zu machen. Die vorliegende Dissertation dient nun dazu dieses Potenzial zu verdeutlichen, sichtbar zu machen und an Beispielen zu bestimmen.

Die Baugeschichte sowie Besonderheiten von Stadtplanung, Architektur und Materialeinsatz führen dazu, dass Regionen, Städte und Gebäude unterschiedliche Strukturen aufweisen. Um gebäudespezifische Intensitäten für unterschiedliche Materialien in Bestandsgebäuden darzustellen, werden verschiedene Datenquellen genutzt. Eine anschließende Sensitivitätsanalyse wird basierend auf Werkplänen von Bestandsgebäuden durchgeführt. Zur Ermittlung der potenziellen Schadstoffbelastung von Bestandgebäuden werden baugeschichtliche Entwicklungen der Material- und Schadstoffverwendung, rechtlichen Grundlagen sowie Bauepochen dargestellt und analysiert. Materialinformationen aus Gebäudeökobilanzen werden für die Charakterisierung neuerer Gebäude sowie der Quantifizierung der Recyclingpotenziale genutzt. Die ermittelten Daten konnten GIS-basiert auf drei Untersuchungsgebiete übertragen und anschließend analysiert werden.

Durch die strategische Erfassung der gebäudespezifischen Daten, war es möglich, ein breites Materialspektrum zu untersuchen und die Lagergrößen zu ermitteln. Die unterschiedlichen Methoden zu Bestimmung der Materialintensitäten liefern nur teilweise vergleichbare Einzelergebnisse. Demnach eignet sich die IÖR-Methode vorzugsweise zur Betrachtung von unterschiedlichen Materialgruppen, da die Kennwerte in dieser Methode angegeben werden und die Sensitivitätsanalyse keine signifikanten Abweichungen ergeben hat. Die ARK-Methode hingegen eignet sich zur Betrachtung von einzelnen Baustoffelementen, da diese in der Methode ausschließlich betrachtet werden. Die Methode der Massenermittlung auf Grundlage von Gebäudeökobilanzierung zeigt die detailliertesten Materialpotenzialberechnung.

Die GIS-basierte Analyse stellt eine Abschätzung des Materiallagers, der potenziellen Schadstoffbelastungen sowie die Recyclingpotenziale in den Untersuchungsgebieten dar. Durch die angelegte Informationsstruktur, die auf dem Datenkatalog aufbaut, ist eine übersichtliche Verarbeitung der Daten möglich.

Bezugnehmend auf die in Kapitel 1.2 gestellten Forschungsfragen wurde festgestellt, dass Literaturwerte die Materialien in Bestandgebäuden wirklichkeitsnah abbilden. Für Deutschland liefert die Gebäude Datenbank des IÖR eine hinreichend genaue Abbildung der Materialien für Bestandsgebäude. Im Vergleich liefern die ermittelten Materialkennwerte auf Basis von gebäudespezifischen Werkplänen exakte Materialmengen sind aber mit einem erhöhtem Berechnungsaufwand verbunden.

Für Neubauten zeigen Gebäudeökobilanzen ein hohes Potenzial exakte Materialmengen und darüber hinaus auch Recyclingpotenziale zu liefern. Die der Gebäudeökobilanz zugrunde gelegten Datenbank der Entsorgungsszenarien müssen erweitert werden um für alle Materialtypen spezifische Werte aufzeigen zu können.

Ein GIS-System ist für eine strategische Erfassung gebäudespezifischer Daten geeignet. Eine strategische Erfassung der gebäudespezifischen Daten ermöglicht die Analyse eines breiten Materialspektrums. Darüber hinaus können die potenziellen Materialsekundärressourcen realer Untersuchungsgebiete dargestellt werden. Bei Betrachtungsebenen über einem Untersuchungsgebiet hinaus ist eine Automatisierung der Datenanalyse und Datenverknüpfung erforderlich. Das erstellte GIS-Modell zeigt sich als ein offenes System mit einer Vielzahl an potenziellen thematischen Erweiterungen. Neue Informationen können zügig eingearbeitet und das GIS-Modell erweitert werden.

Eine Erweiterung der Analyse stellt die ökonomische Bewertung des Materiallagers da. So können die Materialien in den Gebäuden hinsichtlich wirtschaftlich interessanter Ressourcen analysiert und quantifiziert werden. Weiterhin können die Wiederverwertungsmöglichkeiten der Materialpotenziale untersucht werden, die nach einem Abriss freigesetzt werden. Einen weiteren Untersuchungsgegenstand

stellt die Ermittlung der Materialpotenziale dar, die während der Lebenszyklen von Gebäuden in den Gebäudebestand eingespeist werden können.

Zukünftige Forschungen sollten zuverlässigere Datenquellen über die Materialzusammensetzung von Gebäude und Entwicklung von Methoden zur Integration der Materialdatenerfassung in den Baualltag Untersuchungen. Die Entwicklung der BIM-Systeme sollte dahingehend untersucht werden eine automatisierte Generierung der Intensitäten für Neubauten zu erreichen. Sowie Schnittstellen zu GIS-Systemen aufzuzeigen um objektbezogenen Daten in Datenkataloge überführen zu können.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Methodik strategische Erfassung der Sekundärressourcen 19

Abbildung 2: Haustypenmatrix der Gebäudetypologien der IWU (Loga et al. 2015) 22

Abbildung 3: Beispielhaftes Grund-Modul für das Bauteil Fundament (Gruhler et al. 2002) 23

Abbildung 4: Darstellung des systematischen Vorgehens bei der Ermittlung der Baustoffmengen und Emissionen (Gruhler et al. 2002) 25

Abbildung 5: Systematische Vorgehensweise bei der Ermittlung der Materialgehalte in der ARK-Methode (Lichtensteiger 2006) 26

Abbildung 6: Matrix der Modellgebäude der ARK-Methode nach Epoche und Gebäudenutzungstyp (Lichtensteiger 2006) 27

Abbildung 7: Struktureller Aufbau der LEGEP Datenbank (König 2009) 28

Abbildung 8 Vergleich der Stoffintensitäten für MFH, Bestandsgebäude 33

Abbildung 9 Vergleich Stoffintensität für EFH, Bestandsgebäude 34

Abbildung 10 Stoffintensität von EZFH mit Durchschnittswerten im Neubau 40

Abbildung 11 Stoffintensität von MFH mit Durchschnittswerten im Neubau 42

Abbildung 12 Verbindung verschiedener Rechtsgebiete im Abfallrecht, nach (Schröder 2015) 44

Abbildung 13 Vorkommen ausgewählter Schadstoffe im Bauwesen in Abhängigkeiten der Baualtersklassen nach IWU (Funke 2018) 63

Abbildung 14 Übersicht der Lebenszyklusabschnitte und den zugehörigen Unterteilungen, geändert nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) 65

Abbildung 15 Übersicht der Lebenszyklusphasen die Modul D beeinflussen, geändert nach (Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte 2014) 67

Abbildung 16 Verteilung der Entsorgungsszenarien von Recyclingpotenziale auf Basis der Ökobaudat-Datensätze 68

Abbildung 17 Verteilung der Entsorgungsszenarien von Recyclingpotenziale für ein EFH auf Basis der Ökobaudat-Datensätze 70

Abbildung 18 Primärenergie erneuerbar für Konstruktion aller EZFH für Modul D 72

Abbildung 19 Primärenergie nicht erneuerbar für Konstruktion aller EZFH für Modul D 72

Abbildung 20 Primärenergie erneuerbar für Konstruktion aller MFH für Modul D 73

Abbildung 21 Primärenergie nicht erneuerbar für Konstruktion aller MFH für Modul D 73

Abbildung 22 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE, EFZH (1.1_M5) 74

Abbildung 23 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PENRE, EFZH (1.1_M5) 75

Abbildung 24 Treibhauspotenzial für Konstruktion aller EZFH für Modul D 78

Abbildung 25 Treibhauspotenzial für Konstruktion aller MFH für Modul D 79

Abbildung 26 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator THG, EFZH (1.1_M5) 80

Abbildung 27 Untersuchungsgebiete in Bochum „Hustadt“ (links), „Flüssesiedlung“ (rechts) 83

Abbildung 28 Untersuchungsgebiet in München „Prinz-Eugen-Park“ (Immobilien Report München 2011) 83

Abbildung 29 Strategisches Vorgehen bei der Ermittlung von spezifischen Kennwerten (vergl. Abbildung 1). 85

Abbildung 30 Gebäudetypologie „Hustadt“ 87

Abbildung 31 Gebäudetypologie „Flüssesiedlung“ 88

Abbildung 32 Räumliche Verteilung von Beton sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ 90

Abbildung 33 Räumliche Verteilung von Zement sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Hustadt“ 91

Abbildung 34 Räumliche Verteilung von Beton sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ 92

Abbildung 35 Räumliche Verteilung von Zement sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ 93

Abbildung 36 Räumliche Verteilung für Mineralische Baumaterialien sowie prozentuale Verteilung der Gesamtmaterialien im Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ 94

Abbildung 37 Vorkommen von potenziell asbesthaltigen Materialien im Untersuchungsgebiet „Husatdt“ 96

Abbildung 38 Vorkommen von potenziell asbesthaltigen Materialien im Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“ 97

Abbildung 39 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator THG für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ 98

Abbildung 40 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator PERE für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ 99

Abbildung 41 Recyclingpotenzial bezogen auf den Indikator PENRE für das Untersuchungsgebiet „Prinz-Eugen-Park“ 99

Abbildung 42 Recyclingpotenzial für den Indikator THG, „Prinz-Eugen-Park“ 100

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Bauleittypen mit der dazugehörigen Größeneinteilung nach der IWU (Loga et al. 2015) ..21
Tabelle 2: Materialkennwerte nach (Gruhler et al. 2002) ..29
Tabelle 3 Materialkennwerte nach (Lichtensteiger 2006) ..30
Tabelle 4 Materialkennwerte auf Basis von Werkplänen (eigene Berechnungen) ..30
Tabelle 5: Beschreibung der Art der Gebäudedaten (Hafner et al. 2017) ..35
Tabelle 6: Bauteillisten der Gebäudekonstruktion (EZFH) (Hafner et al. 2017) ..37
Tabelle 7: Bauteillisten der Gebäudekonstruktion (MFH) (Hafner et al. 2017) ..38
Tabelle 8 Materialkennwerte aller EZFH ..39
Tabelle 9 Materialkennwerte aller MFH ..41
Tabelle 10 Typische Althölzer bei Bau- und Abbruchabfällen, nach (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) 2013) ..46
Tabelle 11 Beispiele für Asbestbauprodukte geändert nach (Berg und Zwiener 2014) ..48
Tabelle 12 Eigenschaften der geläufigsten Holzschutzmittel; nach (Berg und Zwiener 2014) ..49
Tabelle 13 Beispiele von PAK-haltigen Produkten und deren Verwendungszeitraum, nach (Berg und Zwiener 2014) ..51
Tabelle 14 Eigenschaften und Vorkommen gängiger VOC-Verbindungen, nach (Berg und Zwiener 2014) ..53
Tabelle 15 Potenzielle Schadstoffquellen für Schwer- und Halbmetalle in Gebäuden, nach (Berg und Zwiener 2014) ..54
Tabelle 16 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse A (bis 1859), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) ..56
Tabelle 17 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse B (1860-1918), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) ..57
Tabelle 18 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse C (1919-1948), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) ..57
Tabelle 19 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse D (1949-1957), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015) ..58
Tabelle 20 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse E (1958-1968), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007) ..59
Tabelle 21 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse F (1969-1978), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007) ..60
Tabelle 22 Potenzielle Schadstoffe der Baualtersklasse F (1979-1983), nach (Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung 2015; Zwiener 2007) ..61
Tabelle 23 Verteilung der Entsorgungsszenarien unterteilt nach Materialtypen ..69
Tabelle 24 Vergleich der Verteilung von Entsorgungsszenarien (EFH) ..70
Tabelle 25 Vergleich der Verteilung von Entsorgungsszenarien (MFH) ..71
Tabelle 26 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE und PENRE, EZFH ..76
Tabelle 27 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator PERE und PENRE, MFH ..77
Tabelle 28 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator Treibhauspotenzial, EZFH ..80
Tabelle 29 Verteilung der Entsorgungsszenarien für den Indikator Treibhauspotenzial, MFH ..81

LITERATURVERZEICHNIS

Achenbach, Hermann; Rüter, Sebastian (2016): Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 38). Online verfügbar unter http://hdl.handle.net/10419/129672.

Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit Nordrhein-Westfalen (2004). Unter Mitarbeit von Gerd Zwiener. 1. Aufl. Düsseldorf: MUNLV NRW.

Arora, Mohit; Raspall, Felix; Cheah, Lynette; Silva, Arlindo (2019): Residential building material stocks and component-level circularity. The case of Singapore. In: *Journal of Cleaner Production* 216, S. 239–248. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.199.

Baas, Leenard; Krook, Joakim; Eklund, Mats; Svensson, Niclas (2010): Industrial ecology looks at landfills from another perspective. Regional development dialogue. 31. 169-182. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/257870583_Industrial_ecology_looks_at_landfills_from_another_perspective, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

BauO NRW (2018): Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen. Landesbauordnung 2018 – BauO NRW 2018. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=74820170630142752068, zuletzt geprüft am 29.11.2019.

BBSR (2016): ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter http://www.oekobaudat.de.

BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter http://www.oekobaudat.de/, zuletzt geprüft am 10.02.2016.

Berg, Alexander; Zwiener, Gerd (Hg.) (2014): Schadstoffe in Innenräumen und an Gebäuden. Erfassen, bewerten, beseitigen; mit 79 Tabellen. Gesamtverband Schadstoffsanierung. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: Müller (Bauen im Bestand).

Bergsdal, Håvard; Brattebø, Helge; Bohne, Rolf A.; Müller, Daniel B. (2007): Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock. In: *Building Research & Information* 35 (5), S. 557–570. DOI: 10.1080/09613210701287588.

Bibliographisches Institut GmbH (Hg.) (2019): Duden. Online verfügbar unter https://www.duden.de/, zuletzt geprüft am 30.10.2019.

BMI (2018): Baufachliche Richtlinien Recycling. Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes. Berlin.

BNB: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/, zuletzt geprüft am 05.01.2020.

Bossemeyer, Hans-Dieter; Dolata, Stephan; Schubert, Uwe; Zwiener, Gerd (2016): Schadstoffe im Baubestand. Erkennen und richtig reagieren Katalog nach Bauteilen und Gewerken. Köln: Rudolf Müller.

Brunner, Paul H. (2011): Urban Mining A Contribution to Reindustrializing the City. In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (3), S. 339–341. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x.

Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2004): Practical handbook of material flow analysis. Boca Raton, Fla.: Lewis (Advanced methods in resource and waste management, 1). Online verfügbar unter http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0646/2003055150-d.html.

Buchert, Matthias; Fritsche, Uwe; Jenseit, Wolfgang; Rausch, Lothar; Deilmann, Clemens; Schiller, Georg et al. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland. Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche. Berlin.

Buchert, Matthias; Fritsche, UweR.; Gensch, Carl-Otto; Grießheim, Rainer; Jenseit, Wolfgang; Peter, Brigitte; Rausch, Lothar (1999): Stoffflußbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung. Berlin.

Bundesarbeitskreis Altbauerneuerung (2015): Bauen im Bestand. Katalog für die Altbauerneuerung ; mit 54 Tabellen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: R. Müller.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR): ÖKOBAUDAT. Berlin. Online verfügbar unter https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html.

Condeixa, Karina; Haddad, Assed; Boer, Dieter (2017): Material flow analysis of the residential building stock at the city of Rio de Janeiro. In: *Journal of Cleaner Production* 149, S. 1249–1267. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.080.

Cossu, Raffaello (2013): The Urban Mining concept. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 33 (3), S. 497–498. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.010.

Destatis (2010a): Fachserie 5, Reihe 1: Bauen und Wohnen, Bautätigkeit. Online verfügbar unter www.destatis.de, zuletzt geprüft am 26.03.2019.

Destatis (2010b): Fachserie 5, Reihe 3: Bauen und Wohnen, Bestand an Wohnungen. Online verfügbar unter www.destatis.de, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

DGNB: DGNB Zertifizierungssystem. Online verfügbar unter https://www.dgnb-system.de/de/, zuletzt geprüft am 05.01.2020.

Ebel, W.; Eicke-Hennig, W.; Feist, W.; Groscurth, H.-M. (1995): Einsparungen beim Heizwärmebedarf - ein Schlüssel zum Klimaproblem. Darmstadt.

Ebel, W. et al. (1990): Energiesparpotential im Gebäudebestand. Darmstadt.

ebök (1996): Heidelberger Gebäudetypologie. Heidelberg.

ebök/ifeu (1998): Die MannheimerWärmefibel. Der Ratgeber zur Wärmedämmungund Energieeinsparung. Mannheim.

Eicke-Henning (1997): Die Hessische Gebäudetypologie. Hg. v. Hessische Energiespar-Aktion. Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.energiesparaktion.de/downloads/Wohngebaeudetypologie/hf_040106.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2019.

EnergieAgentur.NRW GmbH: ALTBAUNEU. Eine gemeinsame Initiative von Kreisen und Kommunen in NRW. Online verfügbar unter https://www.alt-bau-neu.de/default.asp, zuletzt geprüft am 07.12.2019.

envilex (2014): Schadstoffe bei Brandereignissen. Online verfügbar unter https://www.envilex.de/schadstoffe-bei-brandereignissen/, zuletzt geprüft am 01.01.2020.

Europäische Kommission: Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Europäische Kommission (2011): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Ressourcenschonendes Europa – eine Leitinitiative innerhalb der Strategie Europa 2020. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0021&from=EN, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Europäische Kommission (2014): Questions and answers on the Commission Communication "Towards a Circular Economy" and the Waste Targets Review. Brüssel. Online verfügbar unter https://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-450_en.htm, zuletzt aktualisiert am 02.07.2014, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Europäische Kommission (2015): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS-UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Den Kreislauf schließen –Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Europäische Kommission (2019): Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

European Commission (2011): Service contract on management of construction and demolition waste. SR1. Final report task 2. Online verfügbar unter https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c9ecefc-d07a-492e-a7e1-6d355b16dde4, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

European Commission (2019): Resource Efficiency - Environment - European Commission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/about/challenge/index_en.htm, zuletzt aktualisiert am 07.08.2019, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Funke, Laura (2018): Erstellung eines GIS-basierten flächendeckenden Schadstoffkataster für die gebaute Umwelt. unv. Masterarbeit. Bochum.

Gantner, Johannes (2018): Einfluss von EPDs im DGNB System am Beispiel eines Bürogebäudes in Massivbauweise. Projektbericht. Berlin.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) (2013). Paderborn: Salzwasser Verlag.

Gontia, Paul; Nägeli, Claudio; Rosado, Leonardo; Kalmykova, Yuliya; Österbring, Magnus (2018): Material-intensity database of residential buildings. A case-study of Sweden in the international context. In: *Resources, Conservation and Recycling* 130, S. 228–239. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.022.

Graedel, T. E. (2011): The prospects for urban mining (The Bridge).

Gruhler, Karin; Böhm, Ruth; Deilmann, Clemens; Schiller, Georg (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe. Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. Dresden: Inst. für ökologische Raumentwicklung e.V (IÖR-Schriften, 38).

Hafner, Annette; Rüter S.; Ebert S.; Schäfer S.; König, H.; Cristofaro L. et al. (2017): THG-Holzbau. Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren.

Hashimoto, Seiji; Tanikawa, Hiroki; Moriguchi, Yuichi (2007): Where will large amounts of materials accumulated within the economy go?--A material flow analysis of construction minerals for Japan. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 27 (12), S. 1725–1738. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.10.009.

Heinrich, Matthias Arnold (2019): Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau. Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham. Unter Mitarbeit von Werner Lang. München: Universitätsbibliothek der TU München.

Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung. Vom 9. August 2005 (2005). Köln: Bundesanzeiger-Verl.-Ges (Bundesanzeiger /Beilage], 57,148a).

Hinz, Eberhard (2006): Gebäudetypologie Bayern. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns. Darmstadt.

Immobilien Report München (2011): Neue Wohnungen für Bogenhausen. München. Online verfügbar unter https://www.immobilienreport.de/wohnen/Prinz-Eugen-Kaserne.php.

Institut Wohnen und Umwelt (Hg.) (2016): Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks. Online verfügbar unter http://episcope.eu/index.php?id=97, zuletzt geprüft am 28.10.2019.

Institut Wohnen und Umwelt: (Hg.) (2012): Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project. Online verfügbar unter http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/report/TABULA_FinalReport_AppendixVolume.pdf, zuletzt geprüft am 28.10.2019.

IWU (2016): IEE Project EPISCOPE. Online verfügbar unter http://episcope.eu/index.php?id=97, zuletzt geprüft am 06.12.2019.

Kleeman, Fritz (2016a): BUILDINGS AS POTENTIAL URBAN MINES: QUANTITATIVE, QUALITATIVE AND SPATIAL ANALYSIS FOR VIENNA. Doctoral Thesis. Wien. Online verfügbar unter https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_250939.pdf.

Kleeman, Fritz; Lederer, Jakob.; Fellner, Johann (2016b): Combining GIS data sets and material intensities to estimate Vienna´s building stock. In: *Expanding boundaries. Systems thinking in the built environment; sustainable built environment (SBE) regional conference Zurich 2016*.

Kleemann, F.; Lederer, J.; Fellner, J.; Rechberger, H. (2016): Wien als Rohstofflager: quantitative, qualitativeund räumliche Analyse. Online verfügbar unter https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_258954.pdf.

Koch-Jugl, Juliane (2015): Hexabromcyclododecan (HBCD). Antworten auf häufig gestellte Fragen. Deutschland. Halle, Saale, Dessau-Roßlau (Hintergrund). Online verfügbar unter http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-51565.

Kohler, Niklaus; Yang, Wei (2007): Long-term management of building stocks. In: *Building Research & Information* 35 (4), S. 351–362. DOI: 10.1080/09613210701308962.

König, H. (2013): Kurzgutachten zur energetischen Gebäudesanierung KONZEPT Ökobaustoffe. Teilstudie: Berechnung der Ökobilanz von Dämmstoffen und Baukonstruktionen im Vergleich. Gröbenzell: Ascona GbR. Online verfügbar unter https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/bauen/PDF/LINK_KOENIG_fuer_BTF.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2016.

König, H. (2015a): LEGEP Handbuch.

König, H.; Mandl, W. (2012): LEGEP – WISSEN-WIKI. Online verfügbar unter http://www.wissen-wiki.de/LEGEP, zuletzt aktualisiert am 27.02.2015, zuletzt geprüft am 10.02.2016.

König, Holger (2009): Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung von Orientierungswerten für Lebenszykluskosten. Teil 1: Bürogebäude Endbericht. Gröbenzell.

König, Holger (2015b): LEGEP Handbuch.

Krause, Karina; Hafner, Annette (2018): Relevance of the information content in module D on circular economy of building materials. Life cycle analysis and assessment in civil engineering,Towards an integrated vision : proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium. Unter Mitarbeit von Robby Caspeele, Luc Taerwe und Dan M. Frangopol. Boca Raton: CRC Press (Life-cycle of civil engineering systems, 5).

Krausmann, Fridolin; Gingrich, Simone; Eisenmenger, Nina; Erb, Karl-Heinz; Haberl, Helmut; Fischer-Kowalski, Marina (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. In: *Ecological Economics* 68 (10), S. 2696–2705. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.

Kropp, Olaf (2018): POP-Abfall-Überwachungs-Verordnung. Praxiskommentar. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 145).

Landeshauptstadt München: Prinz-Eugen-Park. Online verfügbar unter https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Projekte/Prinz-Eugen-Kaserne.html, zuletzt geprüft am 09.01.2020.

LfU (2011): Schadstoffe bei Brandereignissen. Umwelt Wissen. Online verfügbar unter https://www.arguk.de/leistung/gebaeude/documents/Schadstoffe-bei-Brandereignissen.pdf, zuletzt geprüft am 01.01.2020.

Lichtensteiger, Thomas (Hg.) (2006): Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz. 1. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverl.

Lichtensteiger, Thomas; Baccini, Peter (2008): Exploration of urban stock. In: *Journal of Enviromental Engineering and Management*.

Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf.

Lorenz, Wolfgang; Betz, Stefan (2016): Praxis-Handbuch Schimmelpilzschäden. Diagnose und Sanierung : mit 293 Abbildungen und 77 Tabellen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Köln: Rudolf Müller.

Lützkendorf, Thomas (2010): Übertragung des Bewertungssystems nachhaltiges Bauen für Bürogebäude auf den Bestand. Endbericht Teil A und B. Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Daniela Busse. Hg. v. Karlsruher Institut für Technologie KIT. Fakultät für Witschaftwissenschaften, Ökonomie und Ökologie des Wohnungsbaus. Karlsruhe.

Lützkendorf, Thomas; Mielecke, Carmen; Mielecke, Thorsten (2017): Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ - Wissenschaftliche Begleitung der Arbeitsgruppe „Modul D“des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen. Endbericht.

Marcellus-Zamora, Kimberlee A.; Gallagher, Patricia M.; Spatari, Sabrina; Tanikawa, Hiroki (2016): Estimating Materials Stocked by Land-Use Type in Historic Urban Buildings Using Spatio-Temporal Analytical Tools. In: *Journal of Industrial Ecology* 20 (5), S. 1025–1037. DOI: 10.1111/jiec.12327.

Mastrucci, Alessio; Marvuglia, Antonino; Popovici, Emil; Leopold, Ulrich; Benetto, Enrico (2017): Geospatial characterization of building material stocks for the life cycle assessment of end-of-life scenarios at the urban scale. In: *Resources, Conservation and Recycling* 123, S. 54–66. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.07.003.

Meinel, Gotthard; Hecht, Robert; Herold, Hendrik (2009): Analyzing building stock using topographic maps and GIS. In: *Building Research & Information* 37 (5-6), S. 468–482. DOI: 10.1080/09613210903159833.

Merenyi, Stefanie (Hg.) (2014): REACH. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 : Text der konsolidierten Fassung (April 2014) mit einer Einführung und einem Ausblick auf die Weiterentwicklung des Rechtsgebiets ; [Verordnung (EG) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der der Richtline 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 96/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission]. München: GRIN-Verl. (Consolidated substances legislation, Bd. 9).

Moriske, Heinz-Jörn; Szewzyk, Regine (Hg.) (2008): Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Deutschland (Umwelt & Gesundheit / Umweltbundesamt). Online verfügbar unter http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-62097.

Müller, F.; Lehmann, C.; et al. (2017): Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozaen, zuletzt geprüft am 25.10.2019.

Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. ICS 91.010.99, ident (IDT) mit EN 15804:2012+A1:2013-11 (2014). Ausgabe: 2014-04-15, Ersatz für ÖNORM EN 15804:2012-04 (ÖNORM : EN).

Özdemir, Özlem; Krause, Karina; Hafner, Annette (2017): Creating a resource cadaster. A case study of a district in the Rhine-Ruhr metropolitan area. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.

Popp, Manfred: 3D-Gebäudemodell. Grundlage für vielfältige Anwendungen. Online verfügbar unter https://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html, zuletzt geprüft am 10.01.2020.

Rechberger, Helmut; Clement, David (2011): Urban Mining - städtebauliche Rohstoffpotenziale (Tagungsband Beitrag Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, 1).

Richtlinie 2008/98/EG (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.

Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan (2012): Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Abschlussbericht ; Laufzeit des Vorhabens 01.08.2009 - 31.10.2011. Hamburg (Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, 22028808).

Sailer, Erwin; Grabener, Henning J.; Matzen, Ulf; Bielefeld, Volker; Bach, Hansjörg (2014): Immobilien-Fachwissen von A-Z. Das Lexikon mit umfassenden Antworten und Erklärungen auf Fragen aus der Immobilienwirtschaft. 10. Aufl. Kiel: Grabener. Online verfügbar unter http://lexikon.immobilien-fachwissen.de/index.php?UID=0622080414&QUERY=START, zuletzt geprüft am 30.10.2019.

Schiller, Georg; Deilmann, Clemens; Gruhler, Karin; Röhm, Patric; Reichenbach, Jan; Baumann, Janett; Günther, Marko (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Dessau-Roßlau.

Schiller, Georg; Ortlepp, Regine; Krauß, Norbert; Steger, Sören; Schütz, Helmut; Fernandez, Jose Acosta et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Dessau-Roßlau.

Schröder, Marcel (Hg.) (2015): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung ; mit 134 Tabellen. Deutscher Abbruchverband. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: R. Müller (Bauen im Bestand).

Spatari, S.; Bertram, M.; Gordon, Robert B.; Henderson, K.; Graedel, T. E. (2015): Twentieth century copper stocks and flows in North America. A dynamic analysis.

Statista GmbH (2019): Umfrage zu den wichtigsten Problemen für Deutschland 2019. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2739/umfrage/ansicht-zu-den-wichtigsten-problemen-deutschlands/, zuletzt aktualisiert am 13.08.2019, zuletzt geprüft am 02.11.2019.

Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2019): Statistik Wohnen, Gebäude. Kamenz. Online verfügbar unter https://www.statistik.sachsen.de/download/010_GB-Wohnen/F_1_Def.pdf, zuletzt geprüft am 14.12.2019.

Stephan, André; Athanassiadis, Aristide (2017): Quantifying and mapping embodied environmental requirements of urban building stocks. In: *Building and Environment* 114, S. 187–202. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.043.

Tanikawa, Hiroki; Fishman, Tomer; Okuoka, Keijiro; Sugimoto, Kenji (2015): The Weight of Society Over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945-2010. In: *Journal of Industrial Ecology* 19 (5), S. 778–791. DOI: 10.1111/jiec.12284.

Tanikawa, Hiroki; Hashimoto, Seiji (2009): Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. In: *Building Research & Information* 37 (5-6), S. 483–502. DOI: 10.1080/09613210903169394.

Tashina, Jana (2017): Styropor: Bundesrat beschließt Verordnung. HBCD-haltige Dämmstoffe: So läuft die Entsorgung künftig ab. In: *Deutsche Handwerks Zeitung*. Online verfügbar unter https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/entsorgungsengpass-wohin-mit-den-alten-daemmstoffen/150/3094/337881, zuletzt geprüft am 31.12.2019.

TRGS 551 (2015): Technische Regeln für Gefahrstoffe. Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material.

TRGS 905 (2016): Technische Regeln für Gefahrstoffe. Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe.

Tudela, Alejandro Romero Perez de; Rose, Colin M.; Stegemann, Julia A. (2019): Quantification of Material Stocks in Existing Buildings Using Secondary Data- A Case Study for Timber in a London Borough. In: *Resources, Conservation & Recycling: X*, S. 100027. DOI: 10.1016/j.rcrx.2019.100027.

Umweltbundesamt (2013): Quecksilberhaltige Abfälle. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallarten/gefaehrliche-abfaelle/quecksilberhaltige-abfaelle, zuletzt geprüft am 31.12.2019.

Umweltbundesamt (2016a): Häufige Fragen zu Quecksilber. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/haeufige-fragen-zu-quecksilber#textpart-1, zuletzt geprüft am 31.12.2019.

Umweltbundesamt (2016b): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Dessau-Roßlau.

Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) (2013). Paderborn: Salzwasser Verlag.

Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) (2013). Paderborn: Salzwasser Verlag.

Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle und halogenierter Monomethyldiphenylmethane (2013). Paderborn: Salzwasser Verlag.

Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) (2017). Paderborn: Salzwasser Verlag.

Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung - NachwV) (2006).

Walberg, Dietmar (Hg.) (2012): Gebäudetypologie Schleswig-Holstein. Leitfaden für wirtschaftliche und energieeffiziente Sanierungen verschiedener Baualtersklassen. Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen (Bauen in Schleswig-Holstein, 47).

Zhu, Xuan (2014): GIS and Urban Mining. In: *Resources* 3 (1), S. 235–247. DOI: 10.3390/resources3010235.

Zwiener, Gerd (2007): Leitfaden gesundheitsbewusst modernisieren [Elektronische Ressource]. Wohngebäude von 1950 bis 1975. 2. Aufl. Düsseldorf: MUNLV NRW (Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit Nordrhein-Westfalen).

ANHANG

Anhang A

Gebäudepool: „Original"-Gebäude und mineralische Pendants (EZFH) (Hafner et al. 2017)

Kürzel	Gebäudename	Bezeichnung	Baujahr	Gebäudekonstruktion	BGF	BRI	U-Werte [W/(m²K)]					Anzahl Geschosse	energetischer Standard
							Dach	Außenwand	Fenster (U_w)	Haustür	Fußboden		
1.1_H	EFH I	Original	2012	Massivholz mit Zellulosedämmung	215	577	0,16	0,16	1,3	0,88	0,23	EFH (E+1)	KfW 70
1.1_M1		Pendant		Stb u. Mineralwolldämmung*			0,16	0,16	1,3	0,88	0,23		
1.1_M2		Pendant		Stb u. WDVS			0,16	0,20	1,3	0,88	0,23		
1.1_M3		Pendant		Hlz, einschalig			0,16	0,17	1,3	0,88	0,23		
1.1_M4		Pendant		Porenbeton			0,16	0,22	1,3	0,88	0,23		
1.1_M5		Pendant		KS u. WDVS			0,16	0,20	1,3	0,88	0,23		
1.2_H1	EFH II	Original	2009	HTB mit Mineralwolldämmung	176	557	0,18	0,2	1,28	0,9	0,23	EFH (E+1)	EnEV 2009
1.2_H2		Original		Massivholz mit Mineralwolldämmung			0,19	0,19	1,28	0,9	0,23		
1.2_M1		Pendant		Hlz u. WDVS			0,18	0,19	1,28	0,9	0,23		
1.2_M2		Pendant		Hlz, einschalig			0,18	0,19	1,28	0,9	0,23		
1.3_H	ZFH I	Original	2012	Massivholz mit Zellulosedämmung	379	1069	0,16	0,17	1,3	0,88	0,23	Doppel EFH (E+1)	KfW 70
1.3_M1		Pendant		Hlz u. Dämmputz			0,18	0,20	1,3	0,88	0,23		
1.3_M2		Pendant		KS u. WDVS			0,18	0,20	1,3	0,88	0,23		
1.3_M3		Pendant		Porenbeton			0,18	0,20	1,3	0,88	0,23		
1.5_M	EFH III	Original	2011	Hlz u. Dämmputz	245	685	0,18	0,27	1,3	0,8	0,29	EFH (E+ DG)	EnEV 2009
1.6_H	EFH IV	Original	2011	HTB mit Mineralwolldämmung	190	483	0,18	0,25	1,3	0,8	0,29	EFH (E+2)	EnEV 2009
1.6_M1		Pendant		KS u. WDVS			0,18	0,25	1,3	0,8	0,29		
1.6_M2		Pedant		Hlz u. Dämmputz			0,18	0,25	1,3	0,8	0,29		
1.7_H	EFH V	Original	2011	HTB mit Mineralwolldämmung	127	384	0,12	0,25	1,3	0,8	0,29	EFH (E+1)	EnEV 2009
1.7_M		Pendant		Hlz u. Dämmputz			0,12	0,25	1,3	0,8	0,29		
1.8_H	ZFH II	Original	2011	HTB mit Mineralwolldämmung	224	564	0,19	0,25	1,3	0,8	0,29	Doppel EFH (E+2)	EnEV 2009
1.8_M		Pendant		Hlz, einschalig			0,19	0,25	1,3	0,8	0,29		
1.9_H	EFH VI	Original	2009	HTB mit Mineralwolldämmung	209	536	0,17	0,16	0,9	0,8	0,21	EFH (E+1)	KfW 55 - 70
1.9_M1		Pendant		KS u. WDVS			0,18	0,20	0,9	0,8	0,21		
1.9_M2		Pendant		Porenbeton			0,18	0,20	0,9	0,8	0,21		
1.9_M3		Pendant		Hlz u. Dämmputz			0,18	0,20	0,9	0,8	0,21		

*Vormauerziegel (VMZ) in Fassadenbekleidung (Ausbau)

Gebäudepool: „Original"-Gebäude und mineralische Pendants (MFH) (Hafner et al. 2017)

Kürzel	Gebäudename	Bezeichnung	Baujahr	Gebäudekonstruktion	BFG	BRI	U-Werte [W/(m²K)]					Anzahl Geschosse	energetischer Standard
							Dach	Außenwand	Fenster (U_w)	Haustür	Fußboden		
2.2_H	MFH II	Original	2013	HTB u. WDVS	1.394	3.965	0,13	0,18	0,91	1,36	0,3	MFH (E+5)	EnEV 2009
2.2_M		Pendant		Stb u. WDVS			0,19	0,19	0,91	1,36	0,3		
2.3_M	MFH III	Original	2007	Porenbeton bzw. Stb. u. WDVS	7.016	21.943	0,17	0,25	1,3	1,36	0,2	Wohnanlage (E+3)	EnEV 2009
2.4_M	MFH IV	Original	2010	KS u. WDVS	1.478	4.277	0,11	0,11	0,9	0,9	0,14	MFH (E+3)	Passivstandard
2.5_H	MFH V	Original	2006	HTB mit Zellulose u. Mineralwolldämmung	6.152	19.072	0,11	0,15	0,91	0,8	0,17	MFH (E+2)	Passivstandard
2.5_M		Pendant		Hlz u. WDVS			0,11	0,15	0,91	0,8	0,17		
2.6_H	MFH VI	Original	2013	HTB mit Mineralwolldämmung	2.717	8.646	0,11	0,14	0,91	0,9	0,13	MFH (E+3)	Passivstandard
2.6_M		Pendant		Porenbeton bzw. Stb. u. Mineralwolldämmung			0,11	0,17	0,91	0,9	0,13		
2.7_H	MFH VII	Original	2011	Massivholz mit Mineralwolldämmung	2.033	6.172	0,11	0,12	0,9	0,8	0,18	MFH (E+7)	Passivstandard
2.7_M1		Pendant		Porenbeton			0,18	0,2	0,9	0,8	0,18		
2.7_M2		Pendant		Hlz u. Dämmputz			0,18	0,2	0,9	0,8	0,18		
2.7_M3		Pendant		Hlz u. Mineralwolldämmung*			0,18	0,19	0,9	0,8	0,18		
2.9_H	MFH IX	Original	2011	HTB mit Zellulose u. Mineralwolldämmung	1.257	3.876	0,11	0,23	0,88	0,79	0,15	MFH (E+3)	EnEV 2009
2.9_M		Pendant		KS u.WDVS			0,13	0,17	0,88	0,79	0,15		
2.10_H	MFH X	Original	2010	Massivholz mit Mineralwolldämmung	723	2.404	0,14	0,15	0,9	0,8	0,18	MFH (E+3)	EnEV 2009
2.10_M1		Pendant		Porenbeton			0,18	0,2	0,9	0,8	0,18		
2.10_M2		Pendant		Hlz u. Dämmputz			0,18	0,2	0,9	0,8	0,18		
2.10_M3		Pendant		Hlz u. Mineralwolldämmung*			0,18	0,19	0,9	0,8	0,18		
2.12_M	MFH XII	Original	2014	KS u. Mineralwolldämmung*	1765	5363	0,12	0,18	0,9	0,9	0,18	MFH (E+4)	EnEV 2009
2.13_M	MFH XIII	Original	2010	Stb u. WDVS	1348	3933	0,15	0,23	0,92	0,99	0,24	MFH (E+5)	EnEV 2009

*VMZ in Fassadenbekleidung (Ausbau)

Anhang B

Gewichtungen der Gebäudeschadstoffe

Baualtersklasse	Asbest	KMF	HSM	PCB	PAK	Formaldehyd
A (bis 1859)	2	0	3	2	2	0
B (1860 - 1918)	2	3	2	2	2	2
C (1919 - 1948)	5	0	5	5	6	5
D (1949 - 1957)	10	4	7	10	10	9
E (1958 - 1968)	10	4	8	10	10	9
F (1969 - 1978)	10	7	6	10	10	9
G (1979 - 1983)	6	10	4	6	6	6
H (1984 - 1994)	4	9	1	4	4	2
I (1995 - 2001)	0	2	0	1	1	2
J (2002 - 2009)	0	2	0	1	1	2

Anhang C

Anzahl der Datensätze in Modul D für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH)

Anzahl der Datensätze in Modul D EFH				
Bezeichnung	spezifisch		generisch	
	spezifisch mit Gutschrift	spezifisch ohne Gutschrift	generisch mit Gutschrift	generisch ohne Gutschrift
1.1_H	395		428	
	391	4	356	72
1.1_M1	399		441	
	394	5	359	82
1.1_M2	403		435	
	398	5	355	80
1.1_M3	405		438	
	400	5	357	81
1.1_M4	397		439	
	392	5	360	79
1.1_M5	405		443	
	400	5	362	81
1.2_H1	301		349	
	298	3	281	68
1.2_H2	295		337	
	292	3	278	59
1.2_M1	305		351	
	302	3	280	71
1.2_M2	307		347	
	304	3	280	67
1.3_H	367		362	
	359	8	273	89
1.3_M1	319		364	
	314	5	289	75
1.3_M2	310		374	
	305	5	297	77
1.3_M3	312		369	
	307	5	293	76
1.4_H	349		355	
	344	5	266	89
1.5_M	401		417	
	396	5	303	114
1.6_H	420		425	
	416	4	314	111
1.6_M1	428		453	
	424	4	333	120
1.6_M2	438		443	
	434	4	326	117
1.7_H	396		397	
	391	5	295	102
1.7_M	416		429	
	412	4	313	116
1.8_H	379		380	
	374	5	272	108
1.8_M	376		402	
	371	5	291	111
1.9_H	302		359	
	299	3	284	75
1.9_M1	281		350	
	278	3	282	68
1.9_M2	281		346	
	278	3	279	67
1.9_M3	288		343	
	285	3	277	66

Anzahl der Datensätze in Modul D MFH				
Bezeichnung	spezifisch		generisch	
	spezifisch mit Gutschrift	spezifisch ohne Gutschrift	generisch mit Gutschrift	generisch ohne Gutschrift
2.2_H	2763		2888	
	2740	23	2011	877
2.2_M	2731		2918	
	2708	23	2005	913
2.3_M	2671		2790	
	2647	24	1969	821
2.4_M	422		448	
	419	3	315	133
2.5_H	3732		3612	
	3680	22	2608	1004
2.5_M	3975		4288	
	3953	22	2972	1316
2.6_H	574		527	
	569	5	404	123
2.6_M	520		499	
	515	5	397	102
2.7_H	459		467	
	455	4	349	118
2.7_M1	422		448	
	418	4	349	99
2.7_M2	429		445	
	425	4	347	98
2.7_M3	426		457	
	422	4	356	101
2.9_H	2256		2095	
	2241	15	1428	667
2.9_M	2250		2439	
	2235	15	1629	810
2.10_H	432		435	
	427	5	333	102
2.10_M1	434		443	
	430	4	347	96
2.10_M2	441		440	
	437	4	345	95
2.10_M3	438		453	
	434	4	354	99
2.12_M	1364		1468	
	1357	7	972	496
2.13_M	714		687	
	712	2	476	211

Prozentuale Verteilung Datensätze in Modul D für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH)

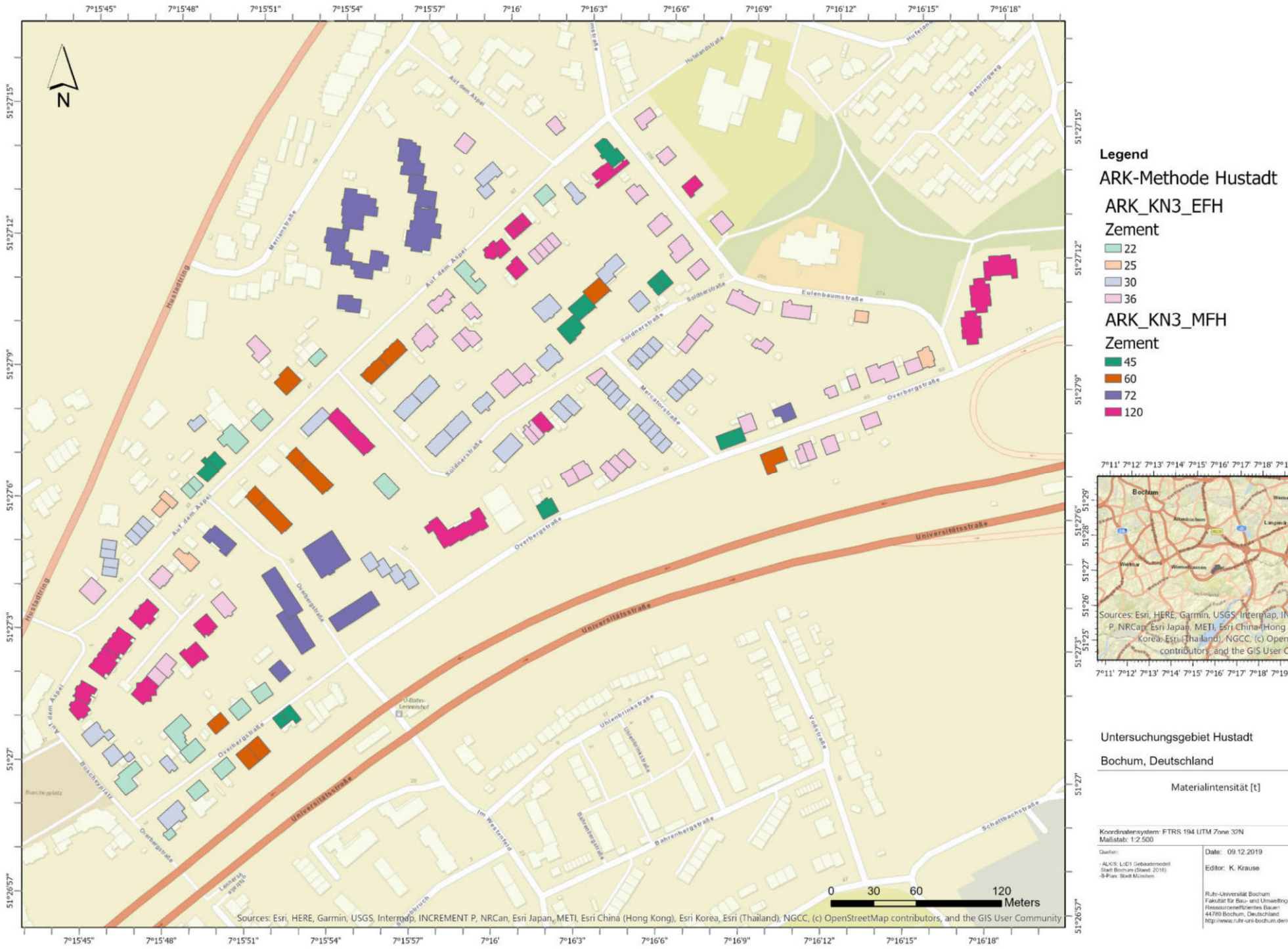
Prozentuale Verteilung der Datensätze in Modul D MFH				
Bezeichnung	spezifisch		generisch	
	spezifisch mit Gutschrift	spezifisch ohne Gutschrift	generisch mit Gutschrift	generisch ohne Gutschrift
1.1_H	48,00%		52,00%	
	47,51%	0,49%	43,26%	8,75%
1.1_M1	47,50%		52,50%	
	46,90%	0,60%	42,74%	9,76%
1.1_M2	48,09%		51,91%	
	47,49%	0,60%	42,36%	9,55%
1.1_M3	48,04%		51,96%	
	47,45%	0,59%	42,35%	9,61%
1.1_M4	47,49%		52,51%	
	46,89%	0,60%	43,06%	9,45%
1.1_M5	47,76%		52,24%	
	47,17%	0,59%	42,69%	9,55%
1.2_H1	46,31%		53,69%	
	45,85%	0,46%	43,23%	10,46%
1.2_H2	46,68%		53,32%	
	46,20%	0,47%	43,99%	9,34%
1.2_M1	46,49%		53,51%	
	46,04%	0,46%	42,68%	10,82%
1.2_M2	46,94%		53,06%	
	46,48%	0,46%	42,81%	10,24%
1.3_H	50,34%		49,66%	
	49,25%	1,10%	37,45%	12,21%
1.3_M1	46,71%		53,29%	
	45,97%	0,73%	42,31%	10,98%
1.3_M2	45,32%		54,68%	
	44,59%	0,73%	43,42%	11,26%
1.3_M3	45,81%		54,19%	
	45,08%	0,73%	43,02%	11,16%
1.4_H	49,57%		50,43%	
	48,86%	0,71%	37,78%	12,64%
1.5_M	49,02%		50,98%	
	48,41%	0,61%	37,04%	13,94%
1.6_H	49,70%		50,30%	
	49,23%	0,47%	37,16%	13,14%
1.6_M1	48,58%		51,42%	
	48,13%	0,45%	37,80%	13,62%
1.6_M2	49,72%		50,28%	
	49,26%	0,45%	37,00%	13,28%
1.7_H	49,94%		50,06%	
	49,31%	0,63%	37,20%	12,86%
1.7_M	49,23%		50,77%	
	48,76%	0,47%	37,04%	13,73%
1.8_H	49,93%		50,07%	
	49,28%	0,66%	35,84%	14,23%
1.8_M	48,33%		51,67%	
	47,69%	0,64%	37,40%	14,27%
1.9_H	45,69%		54,31%	
	45,23%	0,45%	42,97%	11,35%
1.9_M1	44,53%		55,47%	
	44,06%	0,48%	44,69%	10,78%
1.9_M2	44,82%		55,18%	
	44,34%	0,48%	44,50%	10,69%
1.9_M3	45,64%		54,36%	
	45,17%	0,48%	43,90%	10,46%

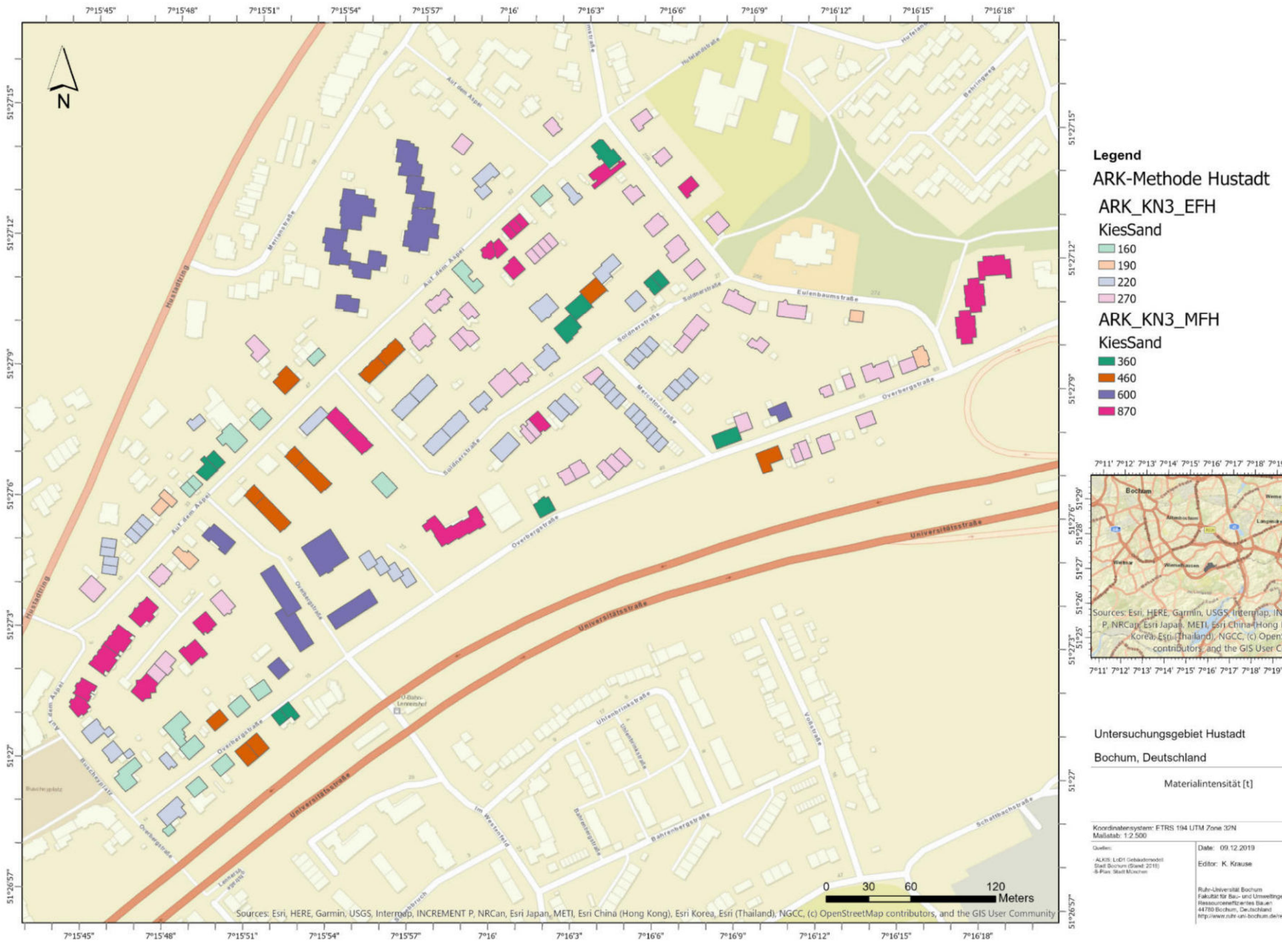
Prozentuale Verteilung der Datensätze in Modul D MFH				
Bezeichnung	spezifisch		generisch	
	spezifisch mit Gutschrift	spezifisch ohne Gutschrift	generisch mit Gutschrift	generisch ohne Gutschrift
2.2_H	48,89%		51,11%	
	48,49%	0,41%	35,59%	15,52%
2.2_M	48,34%		51,66%	
	47,94%	0,41%	35,49%	16,16%
2.3_M	48,91%		51,09%	
	48,47%	0,44%	36,06%	15,03%
2.4_M	48,51%		51,49%	
	48,16%	0,34%	36,21%	25,29%
2.5_H	50,82%		49,18%	
	50,11%	0,30%	35,51%	13,67%
2.5_M	48,11%		51,89%	
	47,84%	0,27%	35,97%	15,93%
2.6_H	52,13%		47,87%	
	51,68%	0,45%	36,69%	11,17%
2.6_M	51,03%		48,97%	
	50,54%	0,49%	38,96%	10,01%
2.7_H	49,57%		50,43%	
	49,14%	0,43%	37,69%	12,74%
2.7_M1	48,51%		51,49%	
	48,05%	0,46%	40,11%	11,38%
2.7_M2	49,08%		50,92%	
	48,63%	0,46%	39,70%	11,21%
2.7_M3	48,24%		51,76%	
	47,79%	0,45%	40,32%	11,44%
2.9_H	51,85%		48,15%	
	51,51%	0,34%	32,82%	15,33%
2.9_M	47,98%		52,02%	
	47,66%	0,32%	34,74%	17,27%
2.10_H	49,83%		50,17%	
	49,25%	0,58%	38,41%	11,76%
2.10_M1	49,49%		50,51%	
	49,03%	0,46%	39,57%	10,95%
2.10_M2	50,06%		49,94%	
	49,60%	0,45%	39,16%	10,78%
2.10_M3	49,16%		50,84%	
	48,71%	0,45%	39,73%	11,11%
2.12_M	48,16%		51,84%	
	47,92%	0,25%	34,32%	17,51%
2.13_M	50,96%		49,04%	
	50,82%	0,14%	33,98%	15,06%

Anhang D

Darstellung der Gebäudetypologie für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“

Darstellung der Materialintensitäten für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“





Legend

ARK-Methode Hustadt

ARK_KN3_EFH

KiesSand

- 160
- 190
- 220
- 270

ARK_KN3_MFH

KiesSand

- 360
- 460
- 600
- 870

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Materialintensität [t]

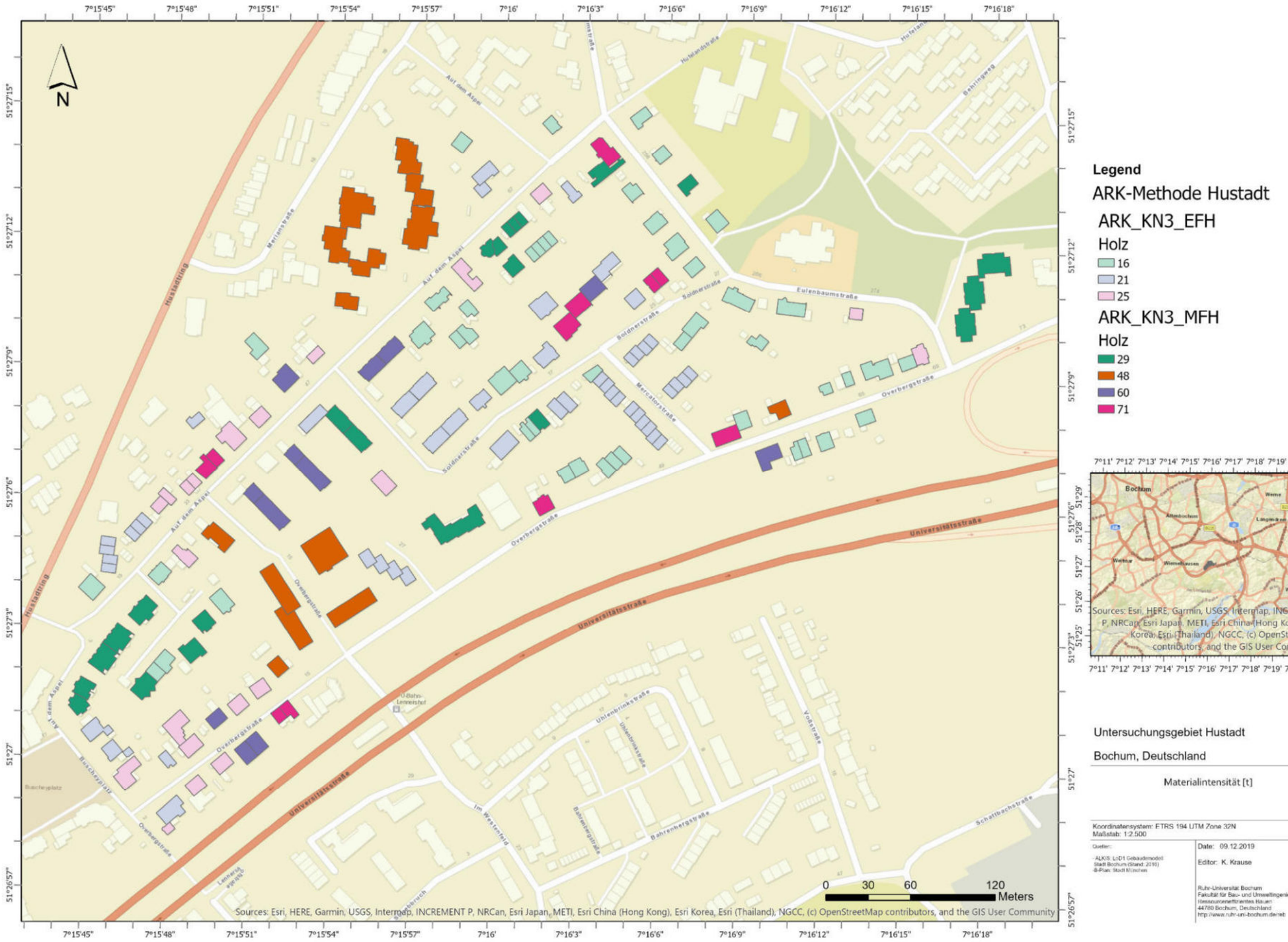
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018)
- B-Plan: Stadt München

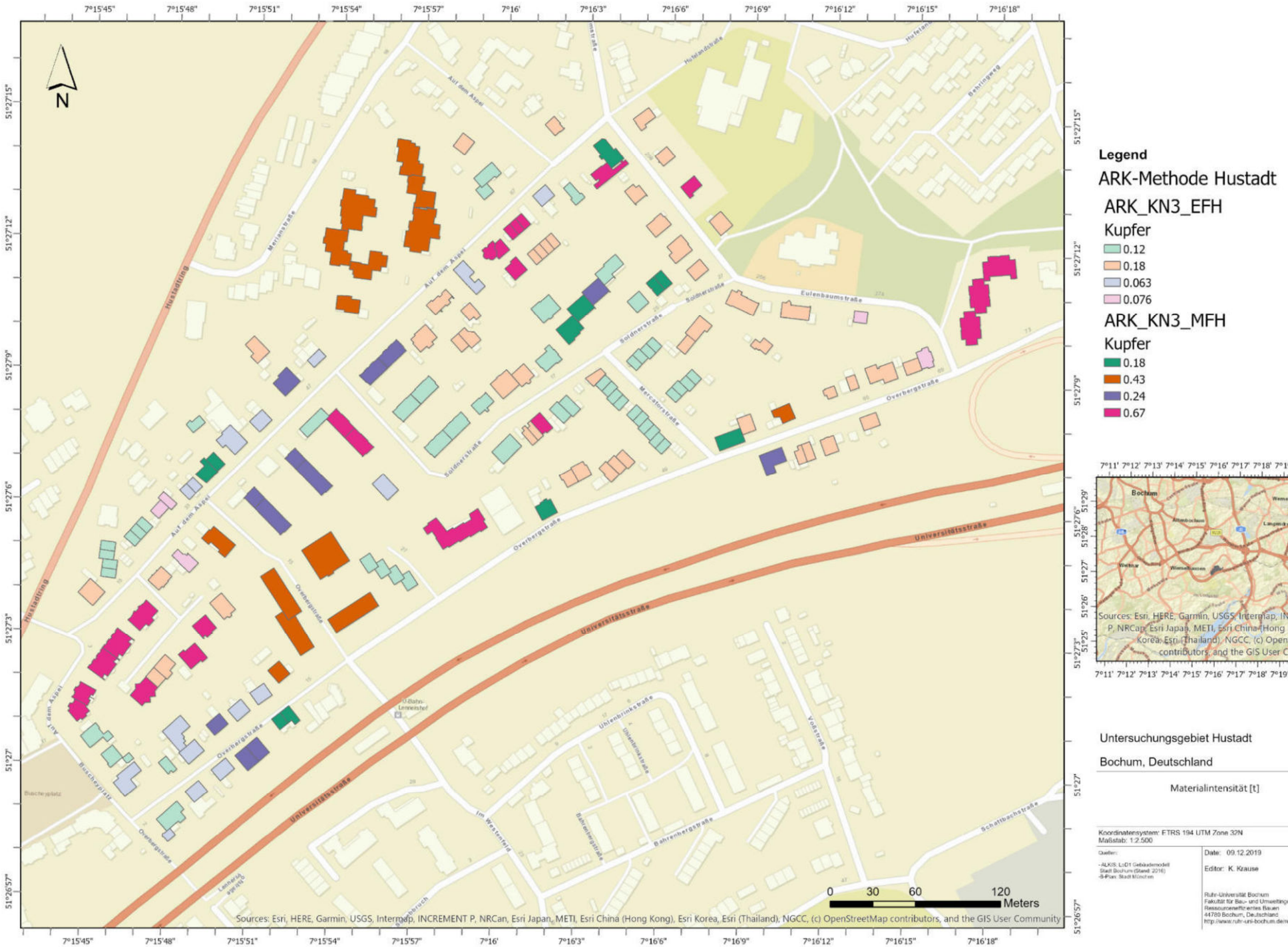
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



N
Legend
ARK-Methode Hustadt
ARK_KN3_EFH
Holz
16
21
25
ARK_KN3_MFH
Holz
29
48
60
71
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Eulenbaumstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Uhlenbrinkstraße
Bahrenbergstraße
Im Westenfeld
Schattbachstraße
Völlstraße
Buscheyplatz
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
0 30 60 120 Meters
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

ARK-Methode Hustadt

ARK_KN3_EFH

Kupfer

- 0.12
- 0.18
- 0.063
- 0.076

ARK_KN3_MFH

Kupfer

- 0.18
- 0.43
- 0.24
- 0.67

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Materialintensität [t]

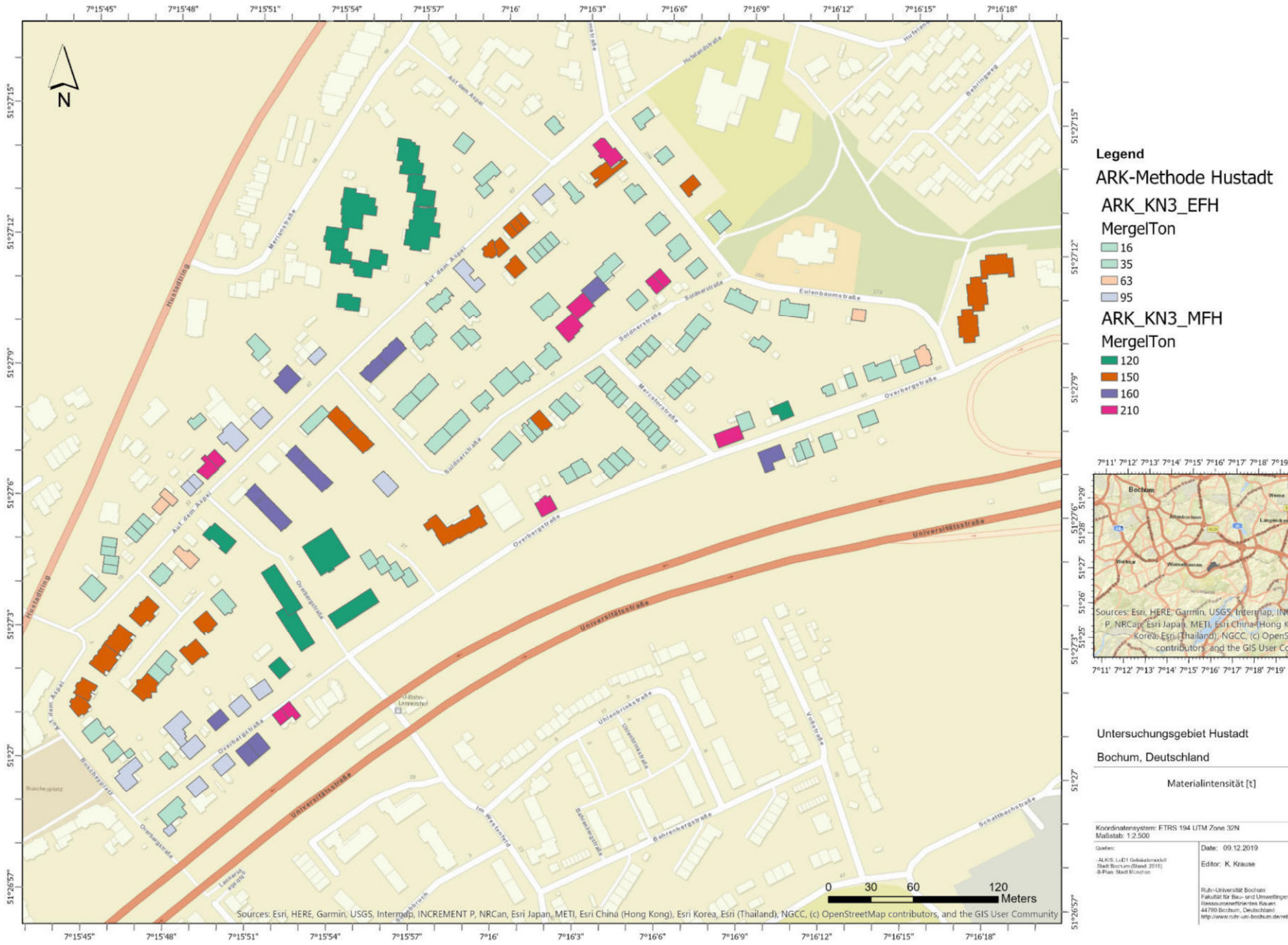
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS, LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

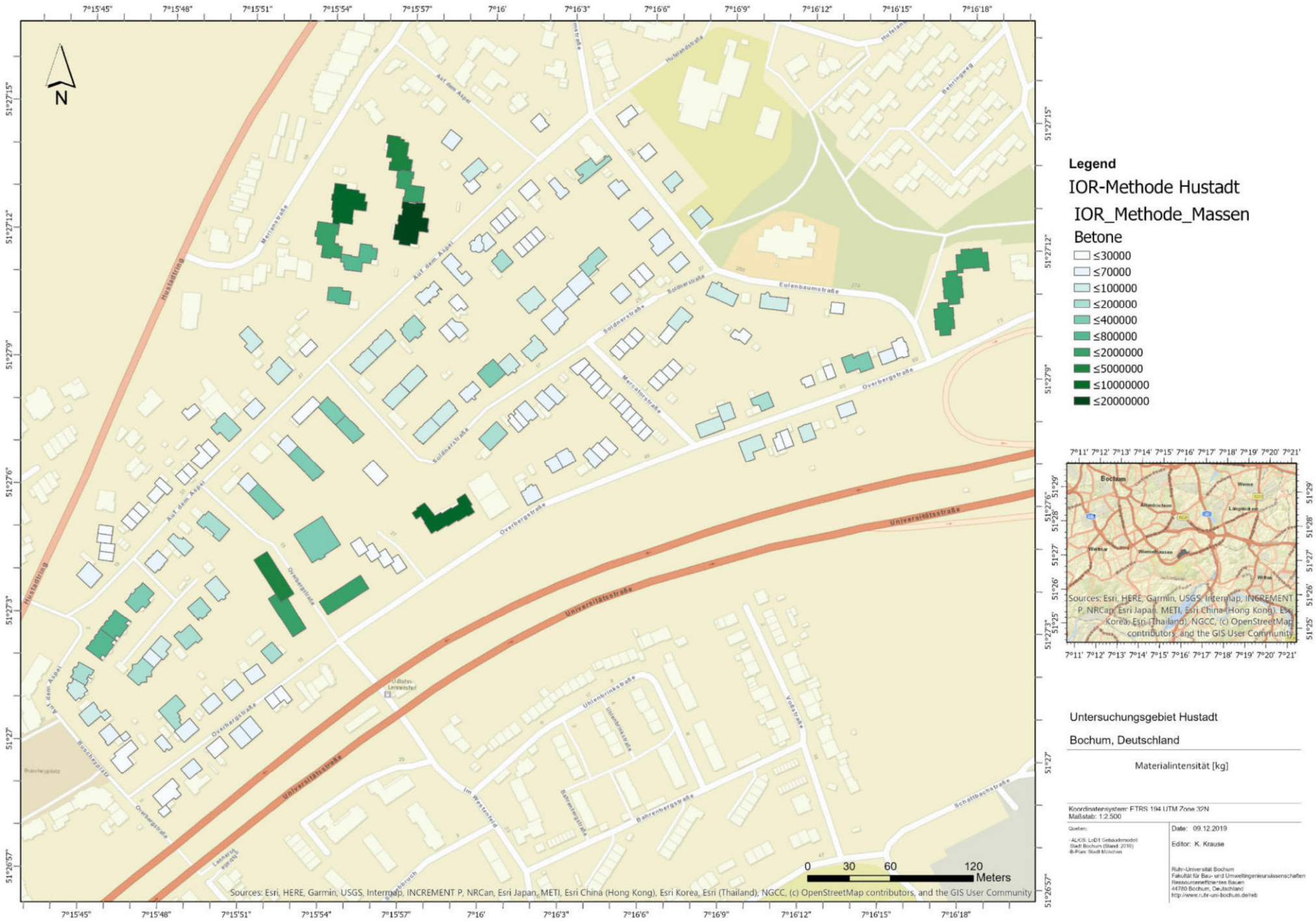
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



N
Legend
ARK-Methode Hustadt
ARK_KN3_EFH
MergelTon
16
35
63
95
ARK_KN3_MFH
MergelTon
120
150
160
210
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Bahrenbergstraße
Schattbachstraße
Im Westenfeld
Uhlenbrinkstraße
Voßstraße
Buscheyplatz
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Behringweg
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Hustadt

IOR_Methode_Massen

Betone

- ≤30000
- ≤70000
- ≤100000
- ≤200000
- ≤400000
- ≤800000
- ≤2000000
- ≤5000000
- ≤10000000
- ≤20000000

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Materialintensität [kg]

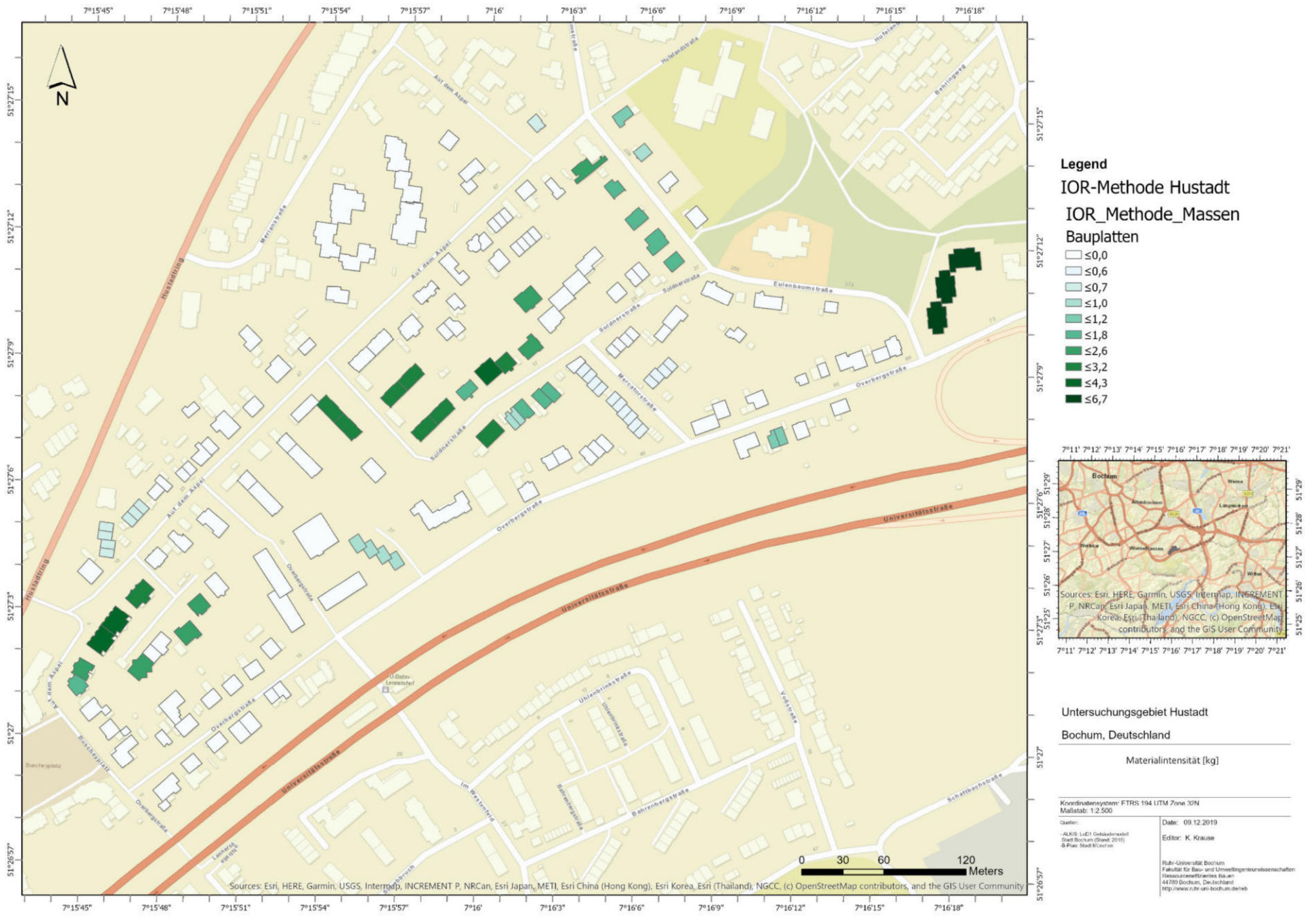
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

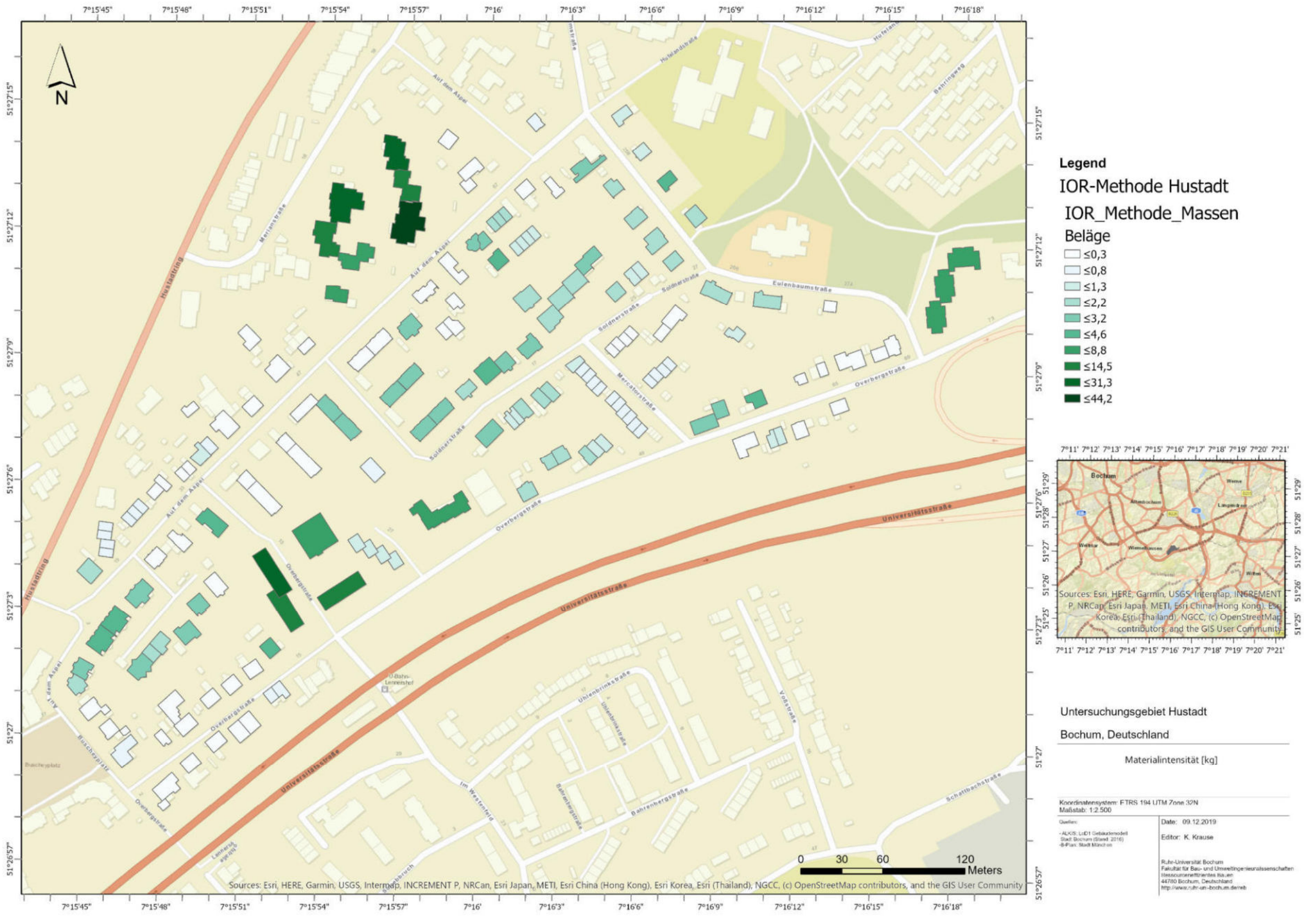
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

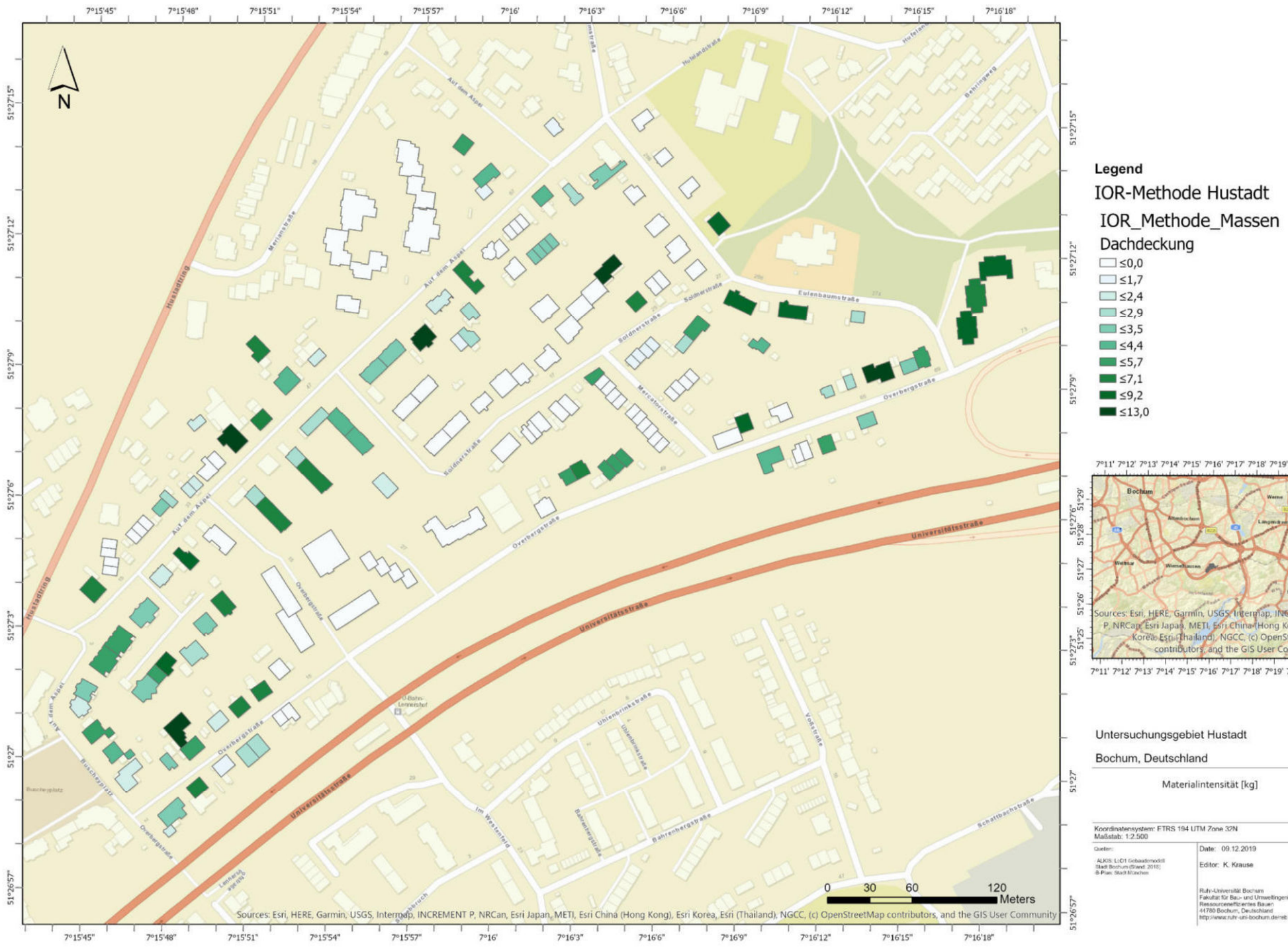
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



N
Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Bauplatten
≤0,0
≤0,6
≤0,7
≤1,0
≤1,2
≤1,8
≤2,6
≤3,2
≤4,3
≤6,7
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Behringweg
Uhlenbrinkstraße
Bahrenbergstraße
Im Westenfeld
Schattbachstraße
Buscheyplatz
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2015)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Beläge
≤0,3
≤0,8
≤1,3
≤2,2
≤3,2
≤4,6
≤8,8
≤14,5
≤31,3
≤44,2
N
Hustadtring
Universitätsstraße
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Behringweg
Uhlenbrinkstraße
Bahrenbergstraße
Im Westenfeld
Voßstraße
Schattbachstraße
Buscheyplatz
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Bochum
Altenbochum
Werne
Langendreer
Weitmar
Wiemelhausen
Witten
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourcenefficientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Hustadt

IOR_Methode_Massen

Dachdeckung

- ≤0,0
- ≤1,7
- ≤2,4
- ≤2,9
- ≤3,5
- ≤4,4
- ≤5,7
- ≤7,1
- ≤9,2
- ≤13,0

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Materialintensität [kg]

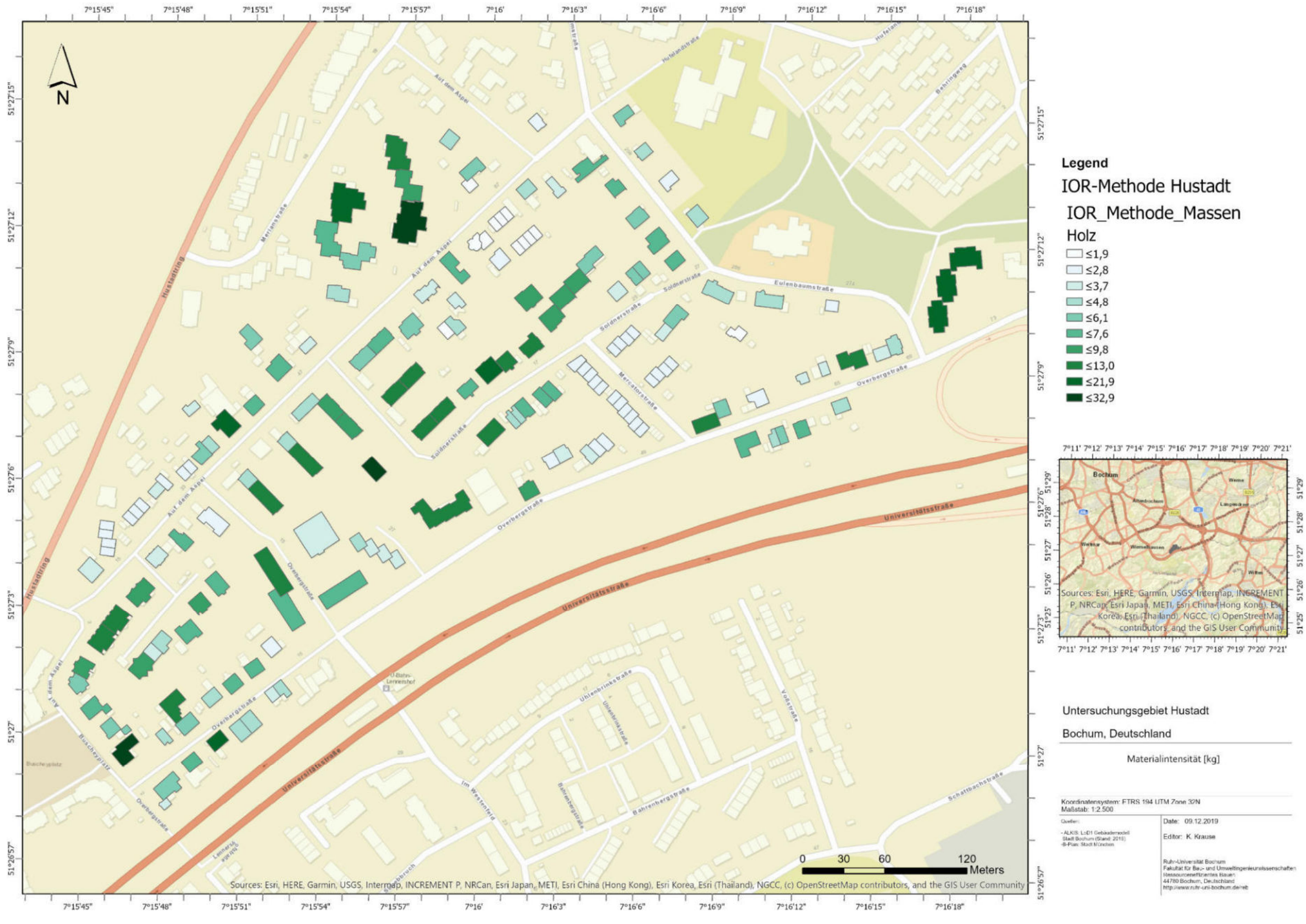
Koordinatensystem: ETRS 1941 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018); © Plan: Stadt München

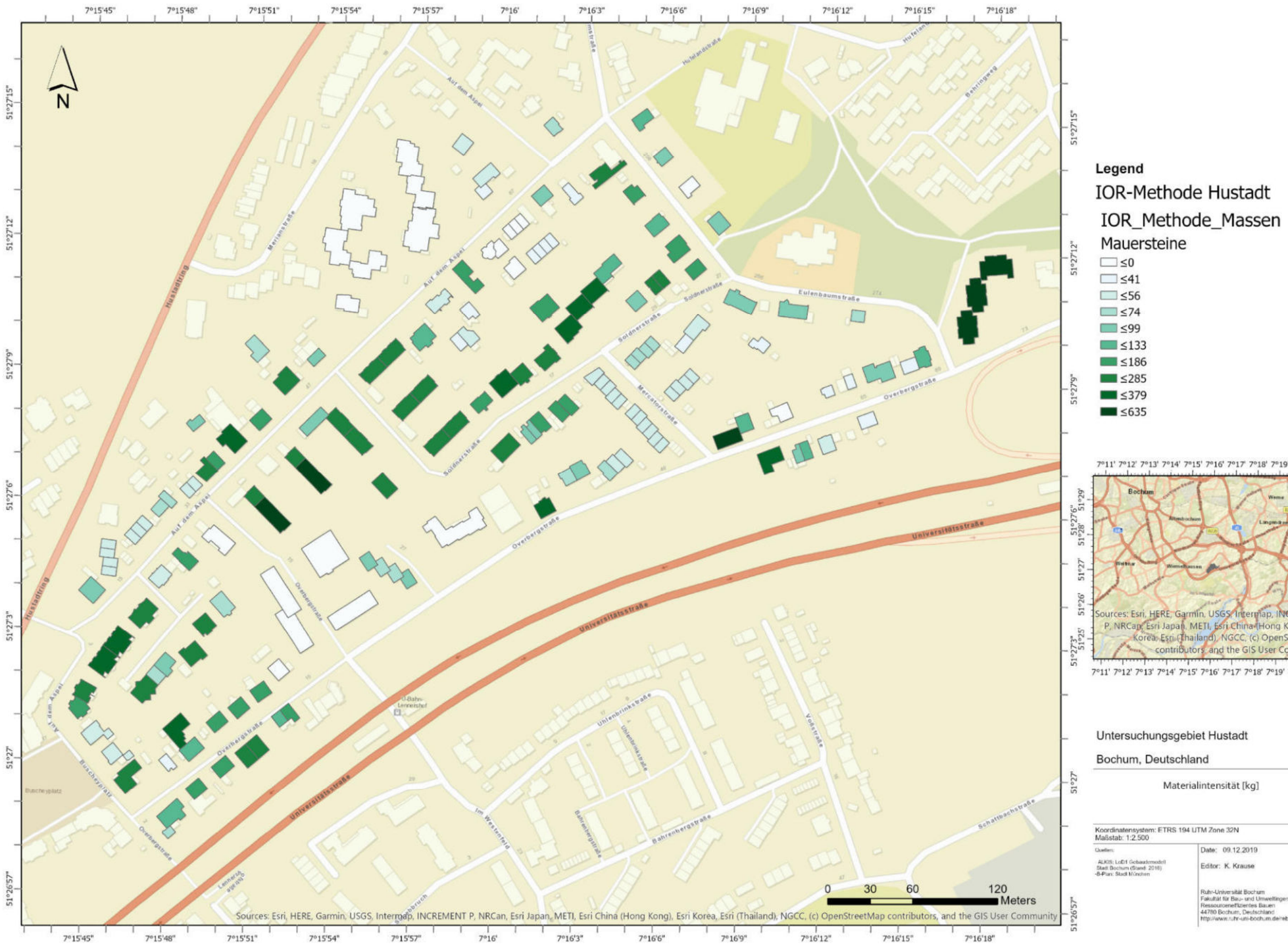
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



N
Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Holz
≤1,9
≤2,8
≤3,7
≤4,8
≤6,1
≤7,6
≤9,8
≤13,0
≤21,9
≤32,9
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Bahrenbergstraße
Schattbachstraße
Im Westenfeld
Uhlenbrinkstraße
Vossstraße
Buscheyplatz
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2019)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Hustadt

IOR_Methode_Massen

Mauersteine

- ≤0
- ≤41
- ≤56
- ≤74
- ≤99
- ≤133
- ≤186
- ≤285
- ≤379
- ≤635

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Materialintensität [kg]

Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

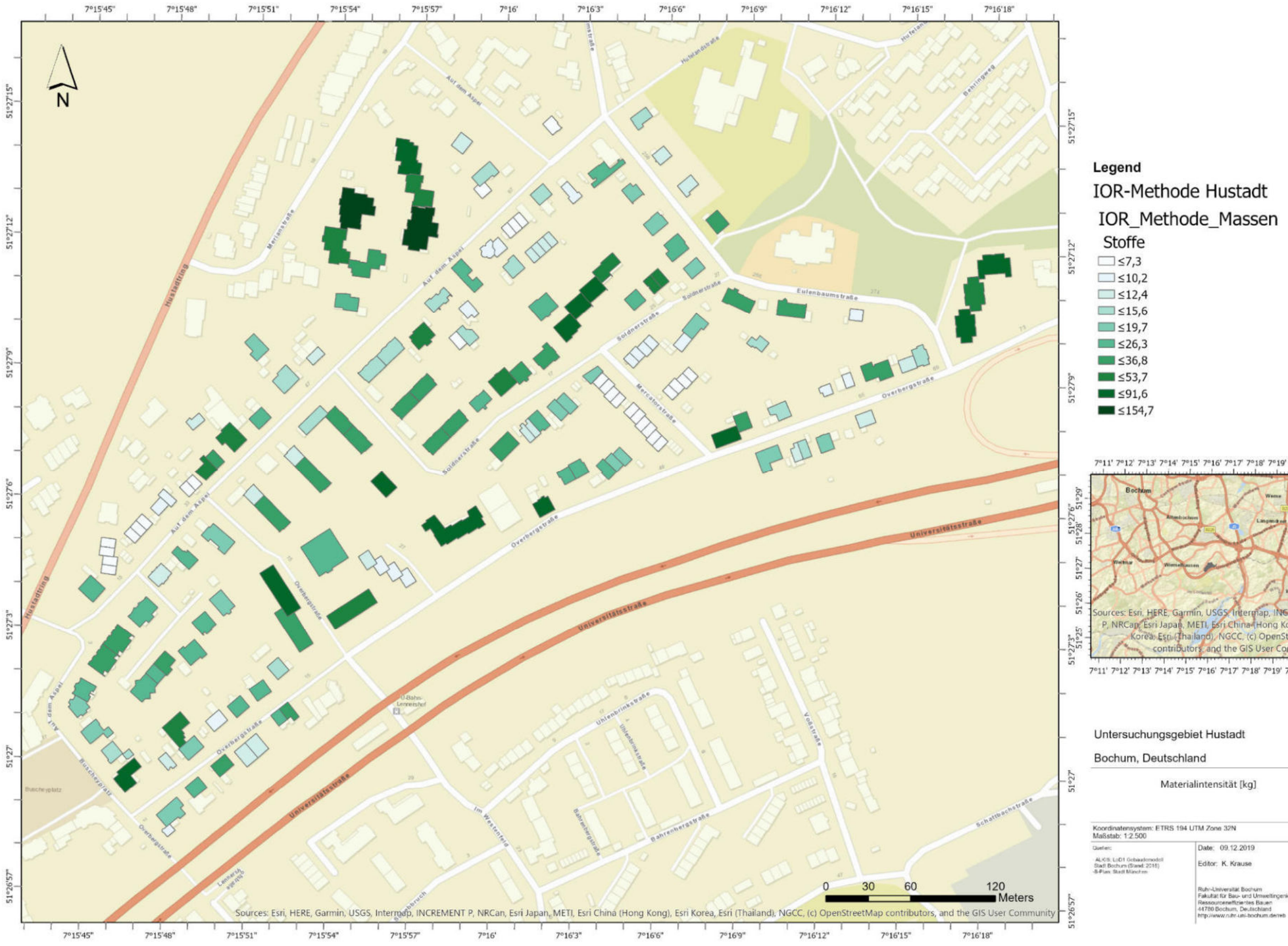
Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

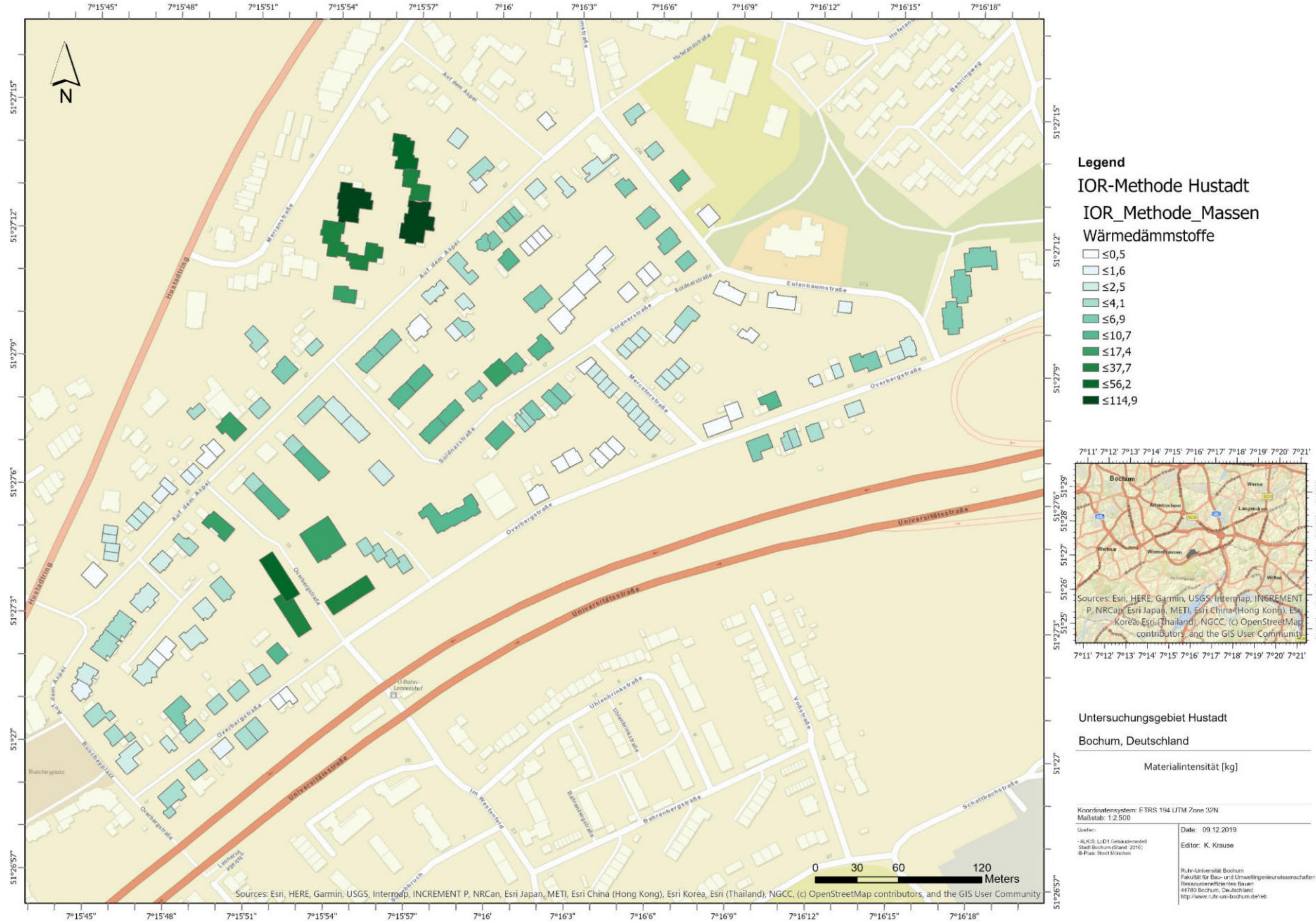
Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

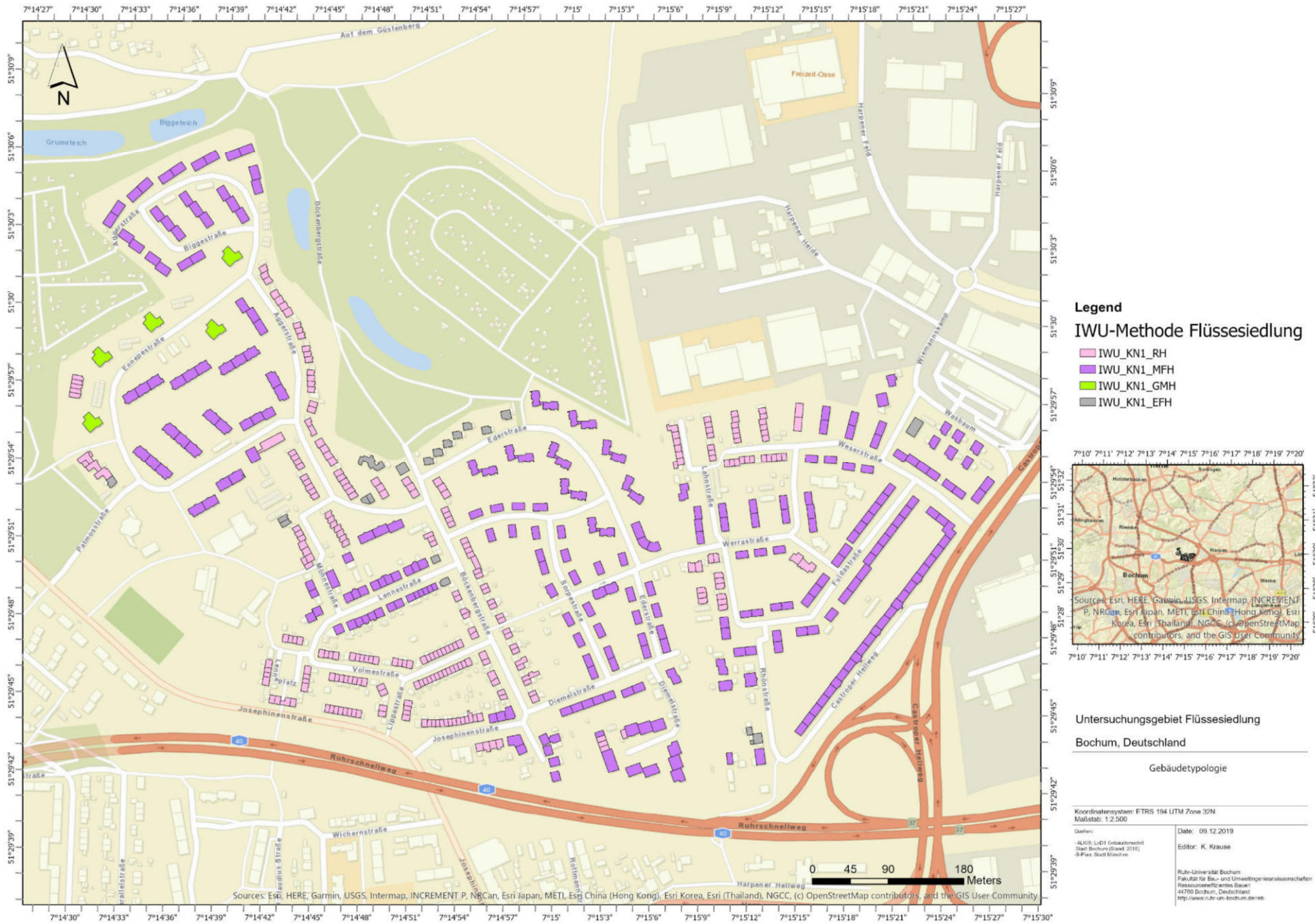
N
7°15'45"
7°15'48"
7°15'51"
7°15'54"
7°15'57"
7°16'
7°16'3"
7°16'6"
7°16'9"
7°16'12"
7°16'15"
7°16'18"
51°27'15"
51°27'12"
51°27'9"
51°27'6"
51°27'3"
51°27'
51°26'57"
Hustadtring
Auf dem Aspei
Meriemstraße
Soldnerstraße
Eulenbaumstraße
Overbergstraße
Mercatorstraße
Hustadtstraße
Beringweg
Universitätsstraße
Uhlenbrinkstraße
Vonstraße
Bahrenbergstraße
Schattbachstraße
Im Westenfeld
Lennershofstraße
Bruchweg
Buschweg
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Metalle
≤0,0
≤4,9
≤8,3
≤12,1
≤16,6
≤28,9
≤52,6
≤97,6
≤187,6
≤330,4
7°11' 7°12' 7°13' 7°14' 7°15' 7°16' 7°17' 7°18' 7°19' 7°20' 7°21'
51°29'
51°28'
51°27'
51°26'
51°25'
Bochum
Herne
Hattingen
Langenberg
Witten
Wetter
Wiemenhausen
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



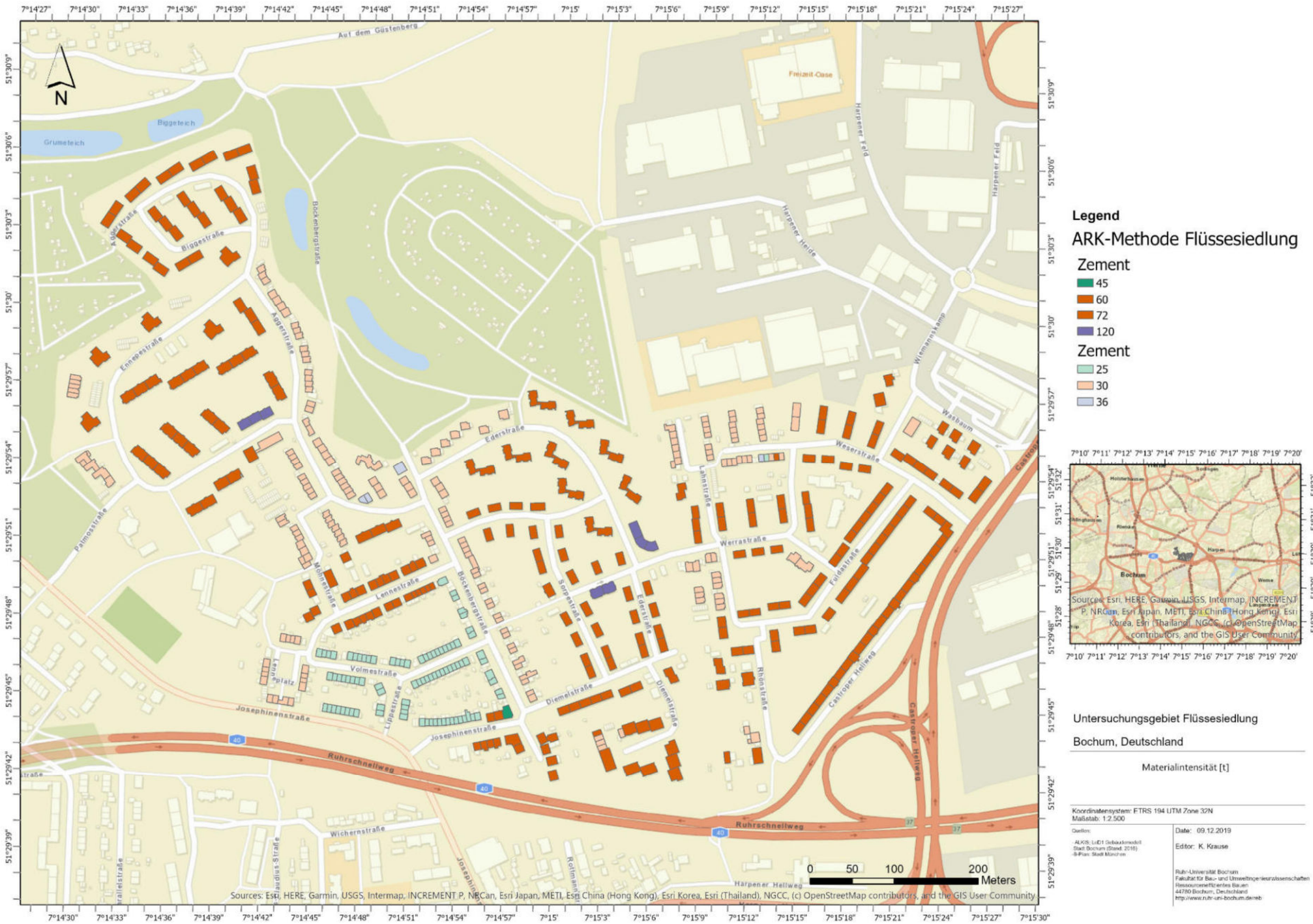
N
Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Stoffe
≤7,3
≤10,2
≤12,4
≤15,6
≤19,7
≤26,3
≤36,8
≤53,7
≤91,6
≤154,7
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Eulenbaumstraße
Mercatorstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Behringweg
Uhlenbrinkstraße
Bahrenbergstraße
Im Westenfeld
Voßstraße
Schattbachstraße
Buscheyplatz
Lennerstraße
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Bochum
Weme
Langendreer
Altenbochum
Wiemelhausen
Wittel
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

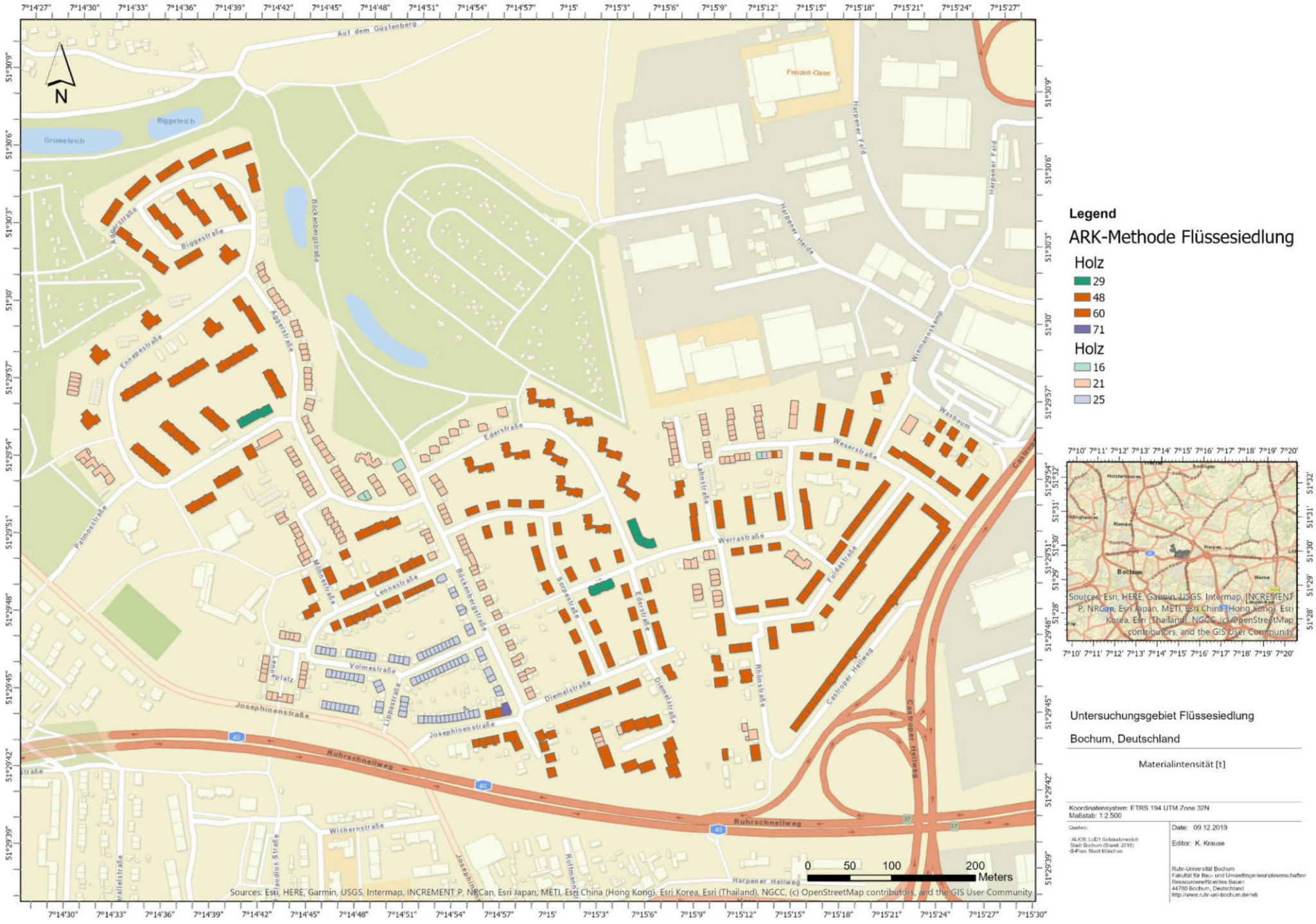

N
Legend
IOR-Methode Hustadt
IOR_Methode_Massen
Wärmedämmstoffe
≤0,5
≤1,6
≤2,5
≤4,1
≤6,9
≤10,7
≤17,4
≤37,7
≤56,2
≤114,9
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Materialintensität [kg]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 30 60 120 Meters
Universitätsstraße
Overbergstraße
Auf dem Aspei
Hustadtring
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

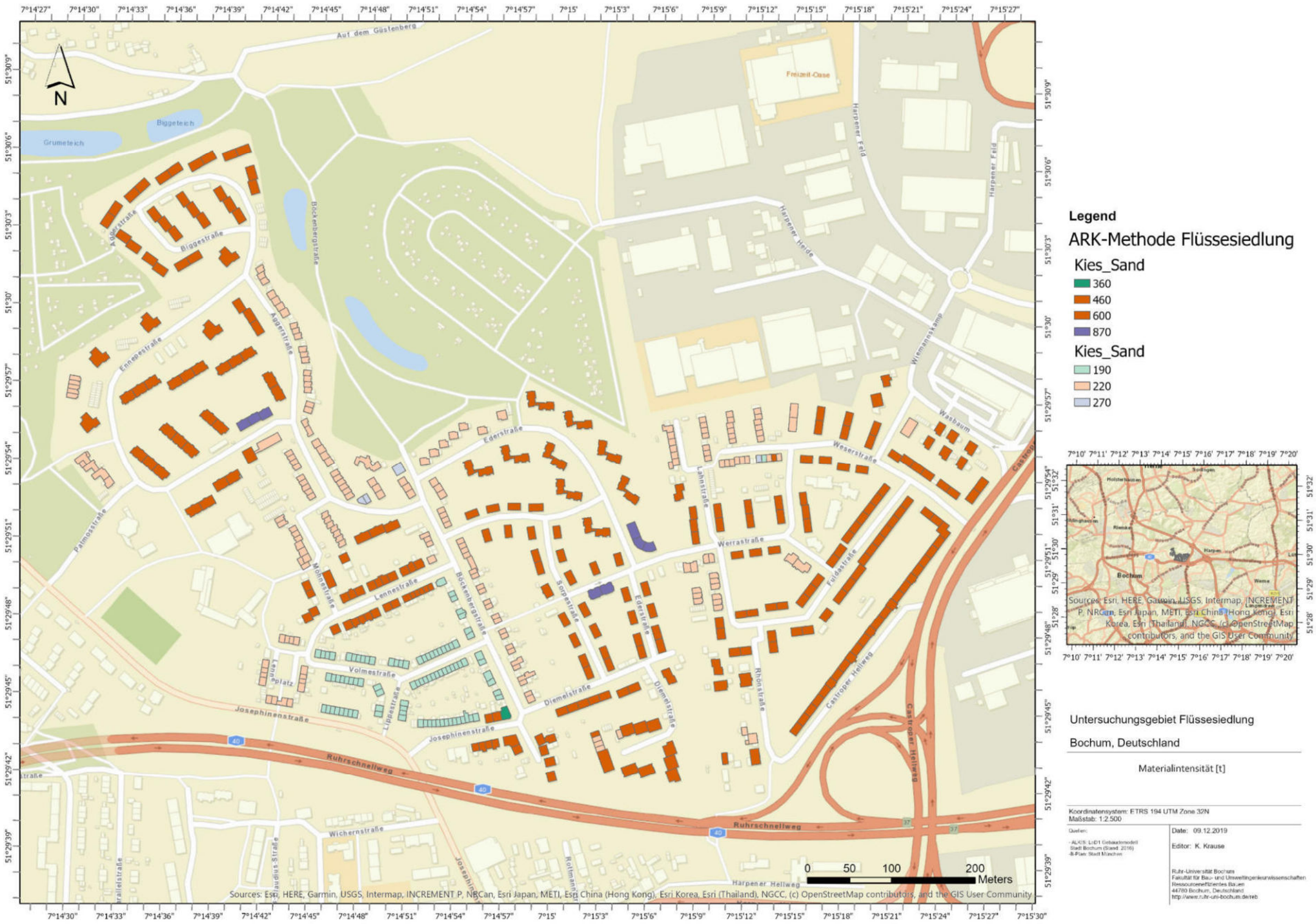
Darstellung der Gebäudetypologie für das Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“



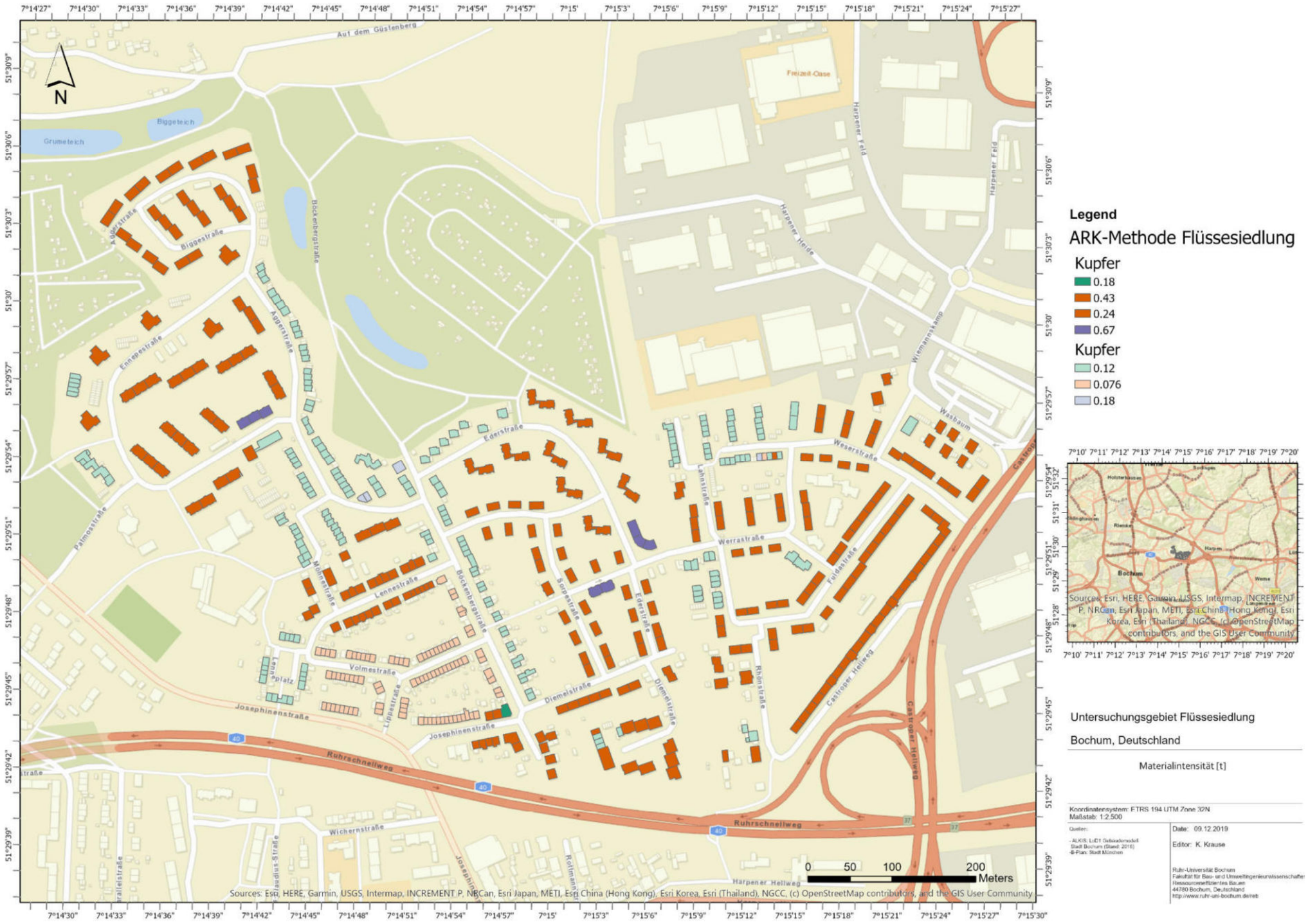
Darstellung der Materialintensitäten für das Untersuchungsgebiet „Flüssesiedlung“



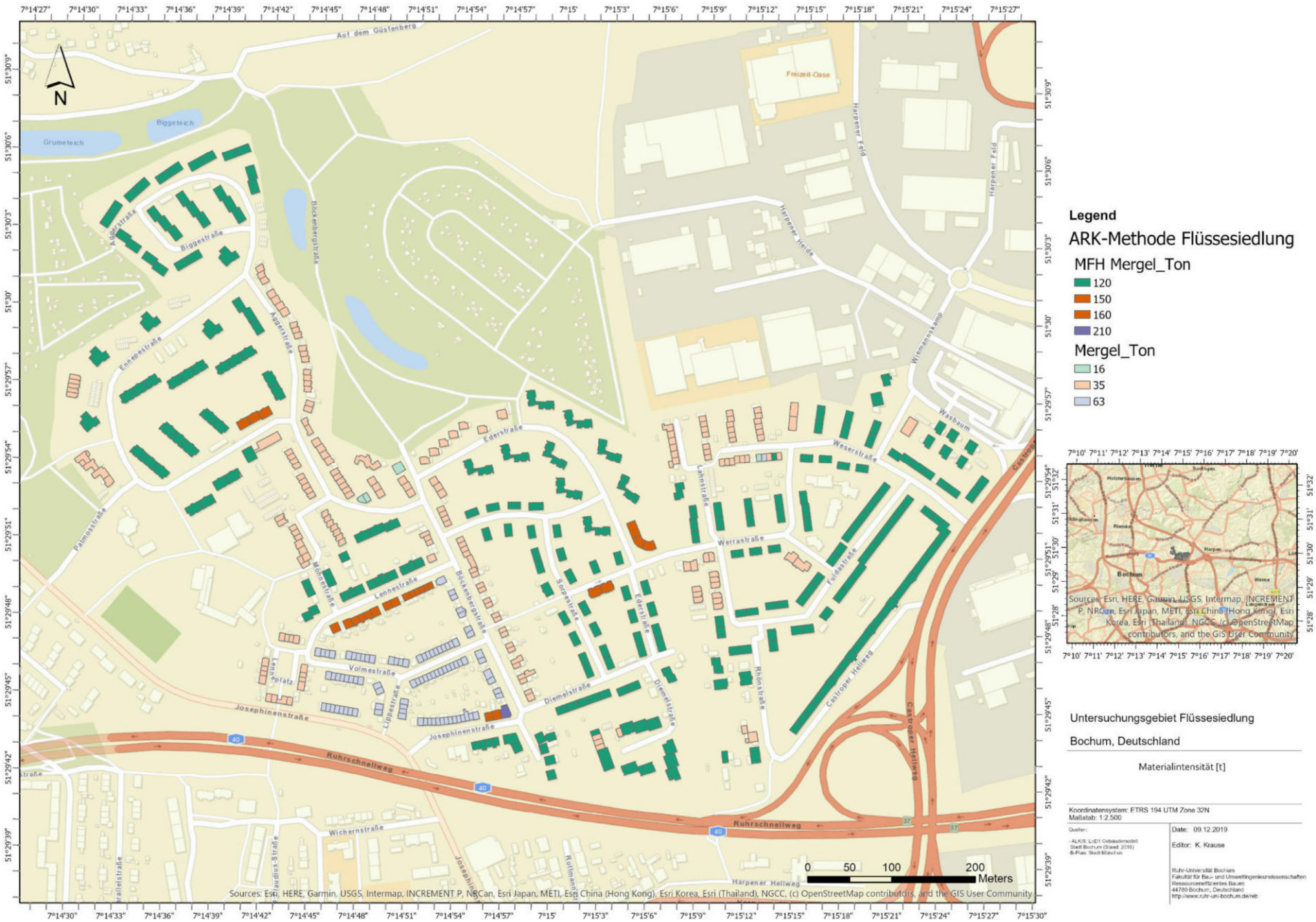

Auf dem Güstenberg
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Grumeteich
Biggeteich
Biggestraße
Aggerstraße
Bockenbergstraße
Ennepestraße
Ederstraße
Washaum
Weserstraße
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Palmostraße
Molmestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhonstraße
Castroper Hellweg
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Raitmann
Harpener Hellweg
N
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
ARK-Methode Flüssesiedlung
Holz
29
48
60
71
Holz
16
21
25
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
3d-Plan Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



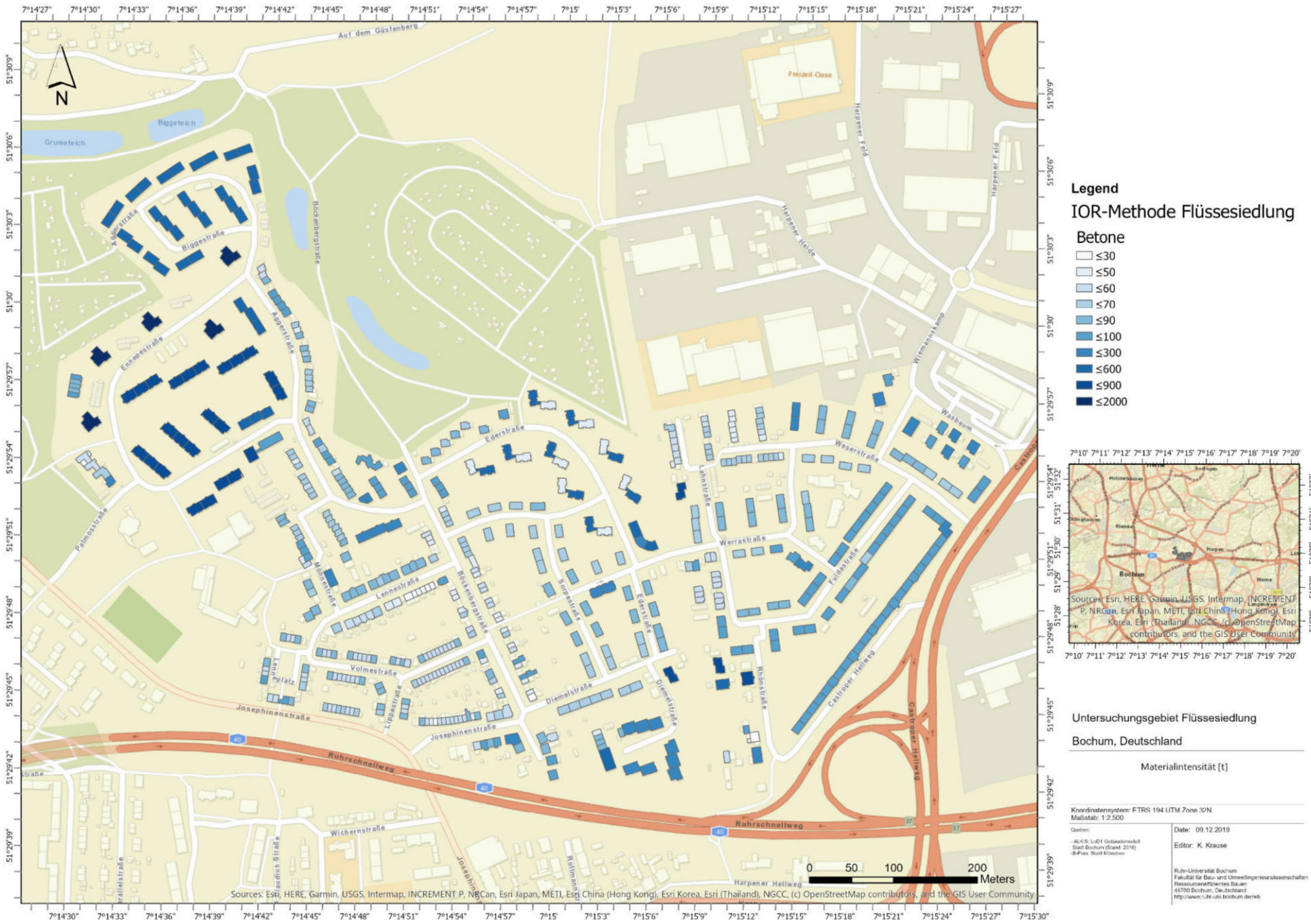
Legend
ARK-Methode Flüssesiedlung
Kies_Sand
360
460
600
870
Kies_Sand
190
220
270
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Wasbaum
Weserstraße
Ederstraße
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Castroper Hellweg
Rhönstraße
Diemelstraße
Sorpestraße
Böckenbergstraße
Aggerstraße
Biggestraße
Ennepestraße
Patmosstraße
Mohnestraße
Lennestraße
Volmestraße
Lippestraße
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
Rottmann
Claudius-Straße
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community



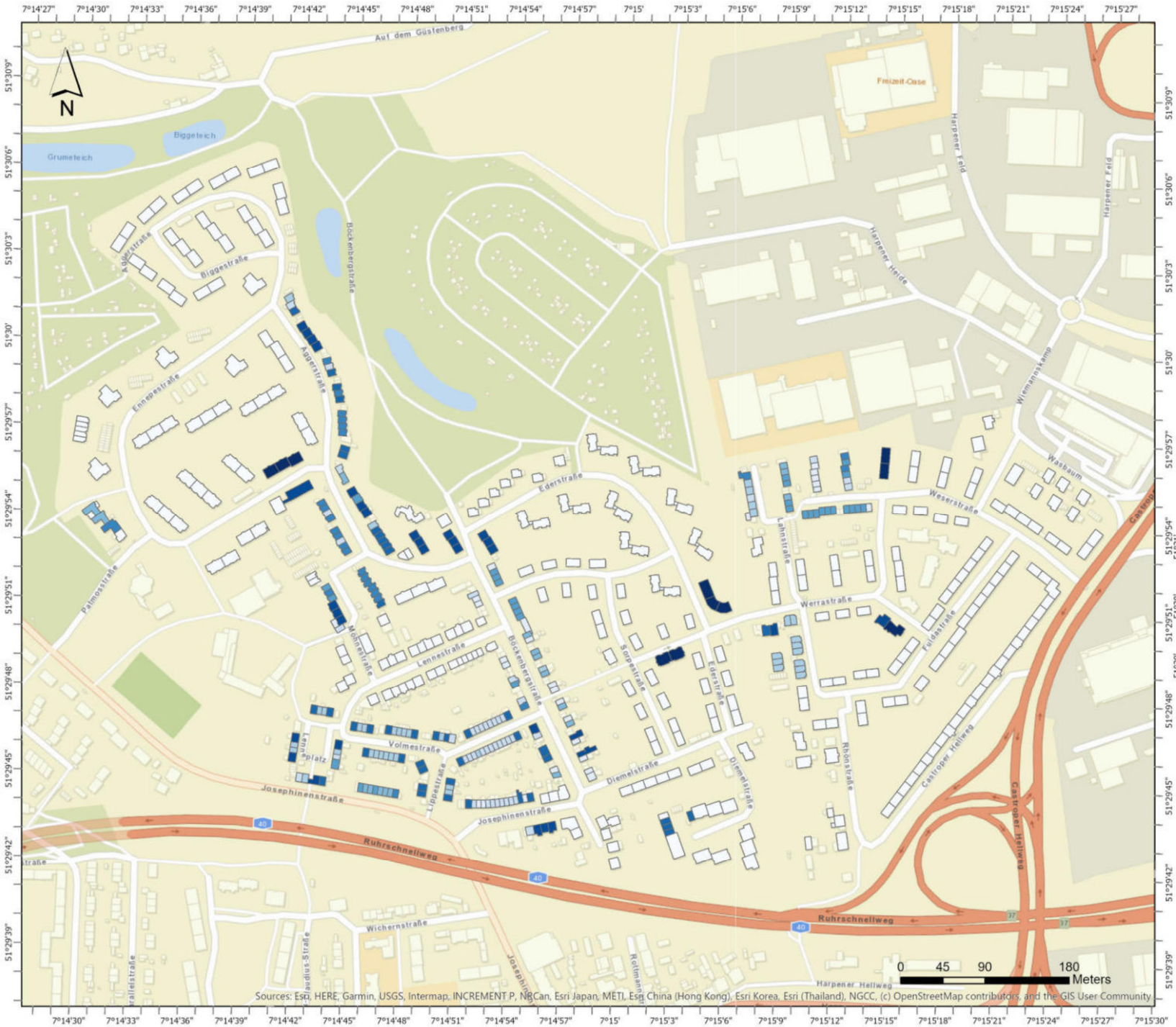
Legend
ARK-Methode Flüssesiedlung
Kupfer
0.18
0.43
0.24
0.67
Kupfer
0.12
0.076
0.18
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Böckenbergstraße
Aggerstraße
Biggestraße
Ennepestraße
Palmosstraße
Edersstraße
Weserstraße
Wasbaum
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Mohnestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Josephinenstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg



Legend
ARK-Methode Flüssesiedlung
MFH Mergel_Ton
120
150
160
210
Mergel_Ton
16
35
63
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Böckenbergstraße
Biggestraße
Aggerstraße
Ennepestraße
Edersstraße
Weserstraße
Wiemannskamp
Wasbaum
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Palmosstraße
Mohnestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Josephinenstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
Bochum



Legend
IOR-Methode Flüssesiedlung
Betone
≤30
≤50
≤60
≤70
≤90
≤100
≤300
≤600
≤900
≤2000
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Wasbaum
Weserstraße
Ederstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Lahnstraße
Rhönstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Josephinenstraße
Volmestraße
Lennestraße
Böckenbergstraße
Sorpestraße
Diemelstraße
Lippestraße
Mohnestraße
Ennepestraße
Aggerstraße
Biggestraße
Palmosstraße
Wichernstraße
Harpener Hellweg



Legend

IOR-Methode Flüssesiedlung

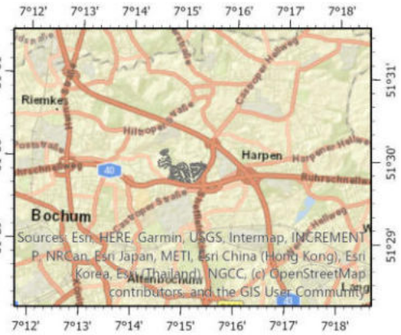
Bauplatten

- ≤0,2
- ≤0,5
- ≤0,6
- ≤0,7
- ≤0,8
- ≤0,8
- ≤0,9
- ≤1,0
- ≤1,6
- ≤2,4

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3



Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

München, Deutschland

Materialpotenzial [t]

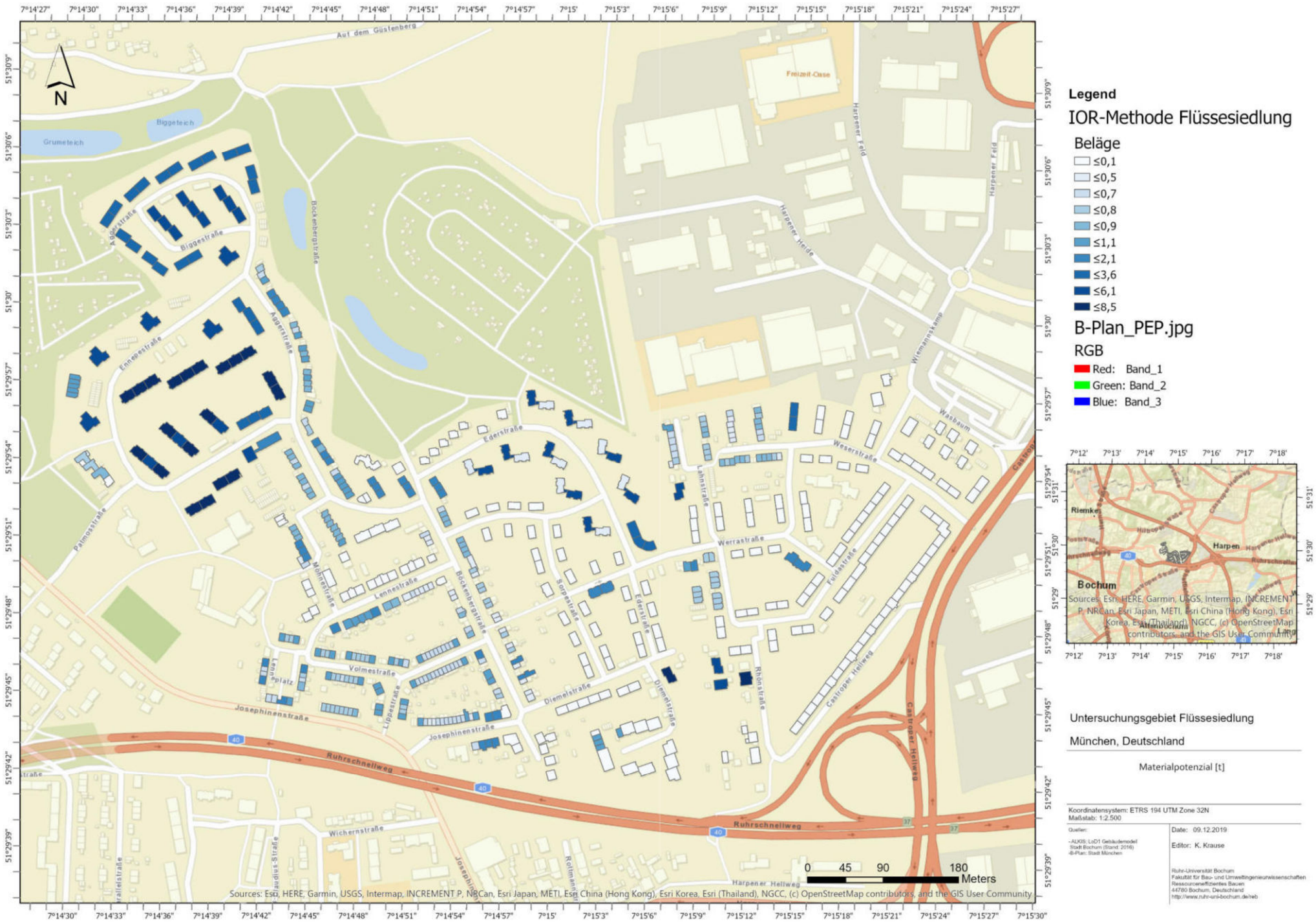
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München

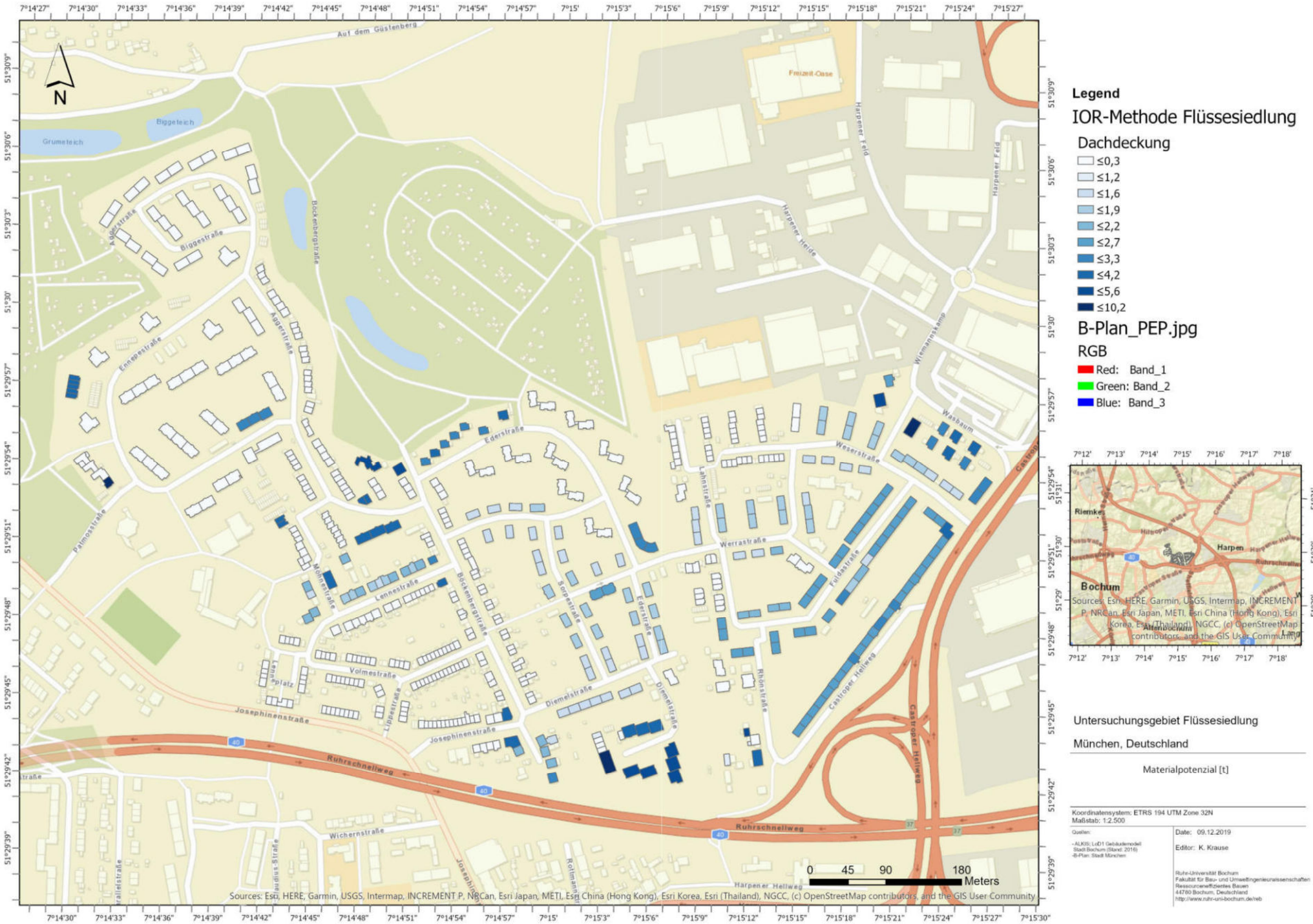
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

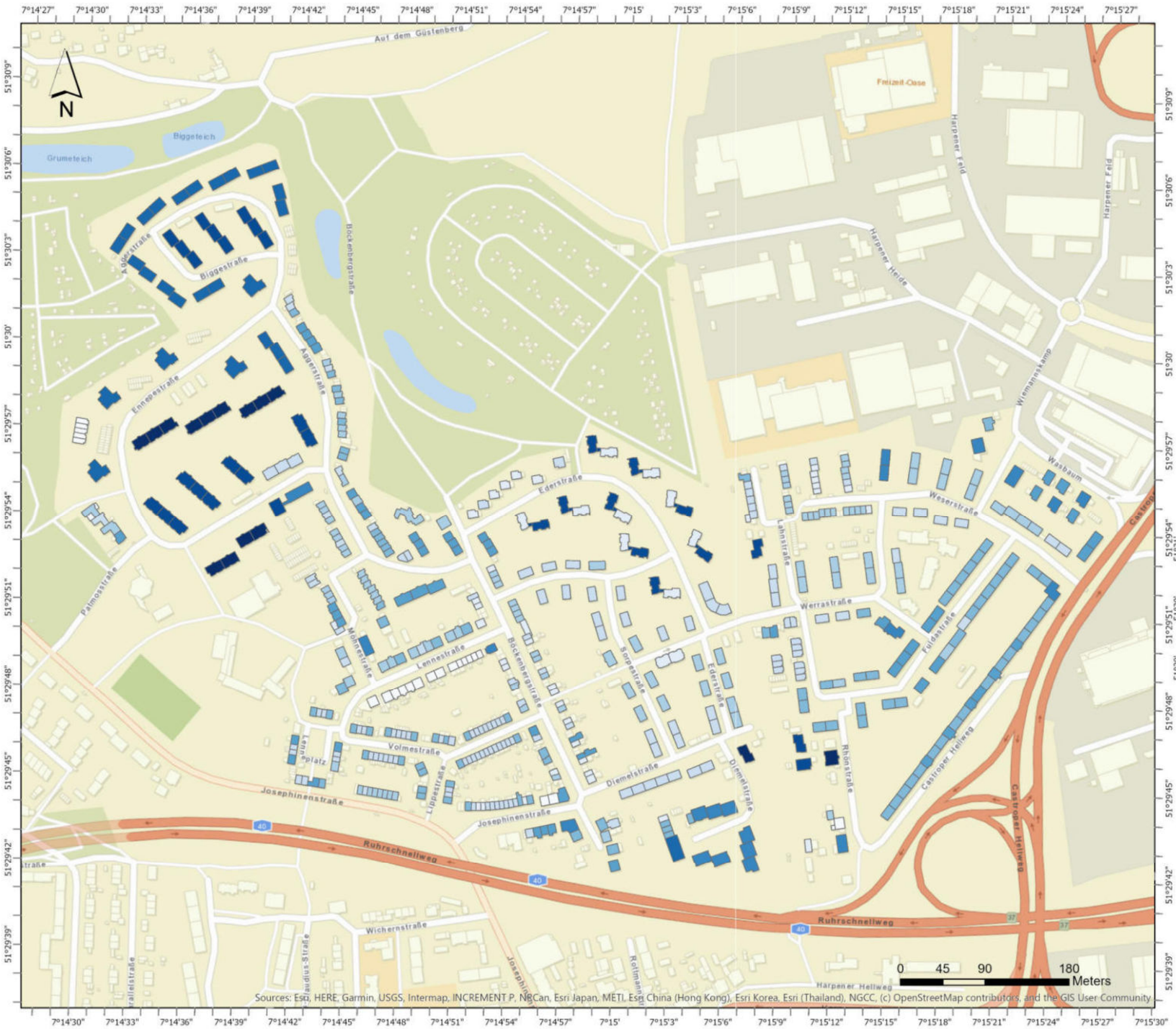
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend
IOR-Methode Flüssesiedlung
Beläge
≤0,1
≤0,5
≤0,7
≤0,8
≤0,9
≤1,1
≤2,1
≤3,6
≤6,1
≤8,5
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
N
0 45 90 180
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Riemke
Harpen
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
München, Deutschland
Materialpotenzial [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend
IOR-Methode Flüssesiedlung
Dachdeckung
≤0,3
≤1,2
≤1,6
≤1,9
≤2,2
≤2,7
≤3,3
≤4,2
≤5,6
≤10,2
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Biggestraße
Aggerstraße
Bockenbergstraße
Ennepestraße
Ederstraße
Weserstraße
Wasbaum
Wiemannskamp
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Patmosstraße
Mohnestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lenneplatz
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Josephinenstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
0 45 90 180
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Riemke
Harpen
Bochum
Altenbochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
München, Deutschland
Materialpotenzial [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Flüssesiedlung

Wärmedämmstoffe

- ≤0,7
- ≤1,6
- ≤2,2
- ≤2,6
- ≤3,2
- ≤4,6
- ≤6,9
- ≤10,8
- ≤16,7
- ≤22,1

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3

Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

München, Deutschland

Materialpotenzial [t]

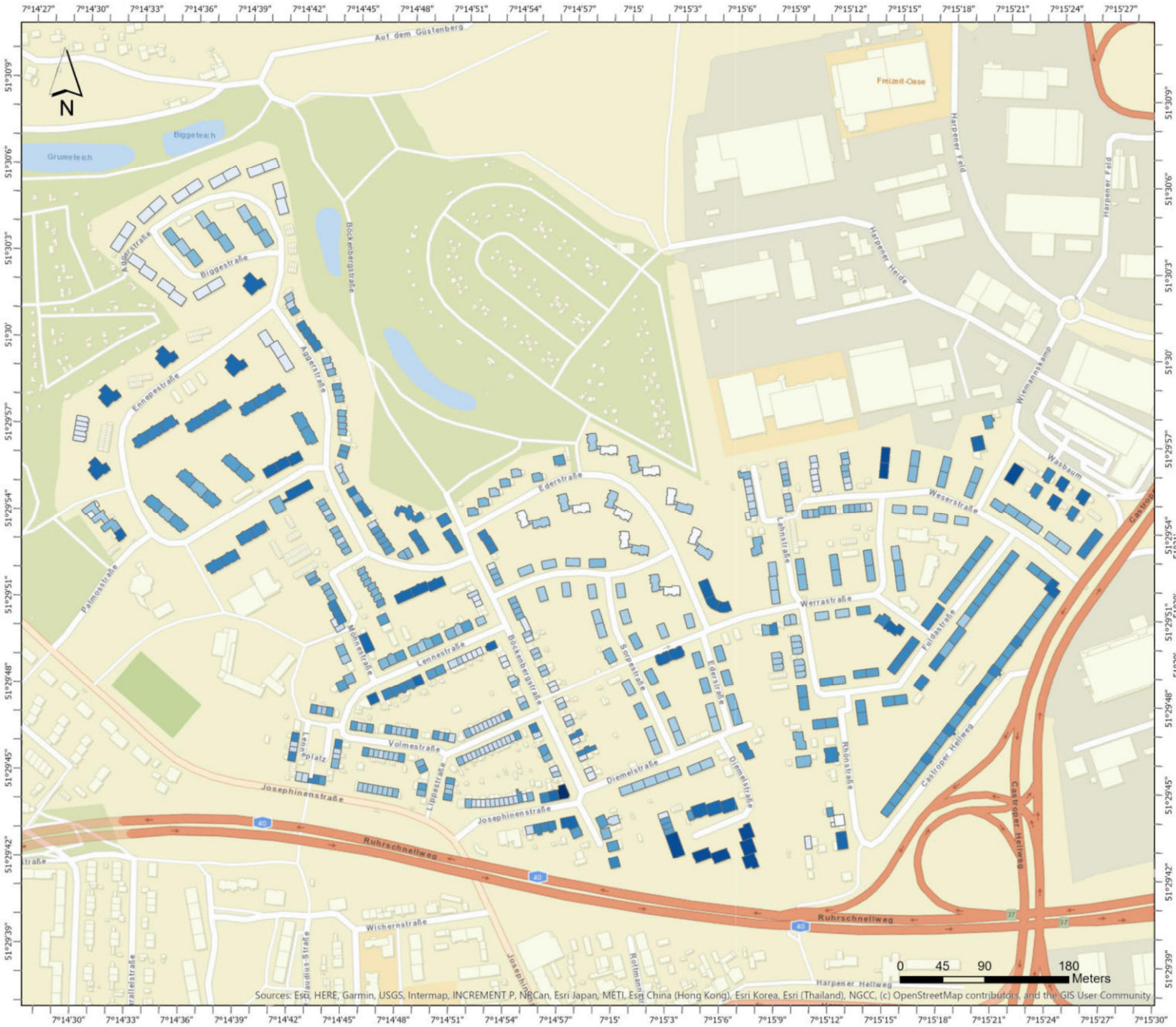
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Flüssesiedlung

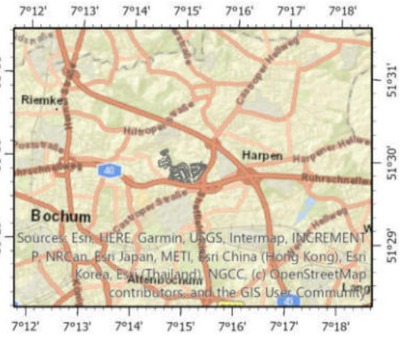
Holz

- ≤1,2
- ≤2,2
- ≤2,6
- ≤3,1
- ≤3,6
- ≤4,4
- ≤5,8
- ≤8,1
- ≤14,9
- ≤24,0

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3



Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

München, Deutschland

Materialpotenzial [t]

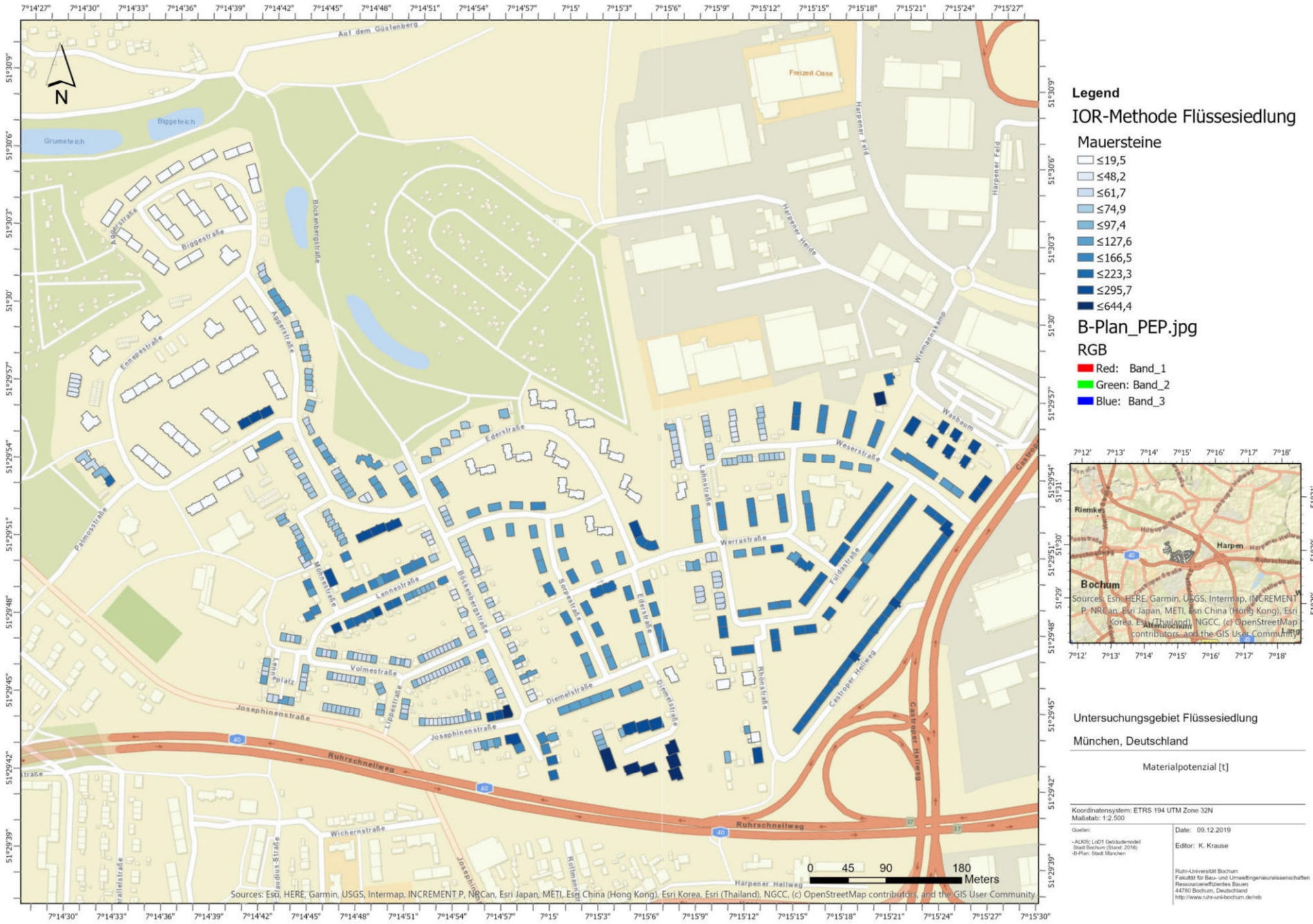
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

IOR-Methode Flüssesiedlung

Mauersteine

- ≤19,5
- ≤48,2
- ≤61,7
- ≤74,9
- ≤97,4
- ≤127,6
- ≤166,5
- ≤223,3
- ≤295,7
- ≤644,4

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3

Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

München, Deutschland

Materialpotenzial [t]

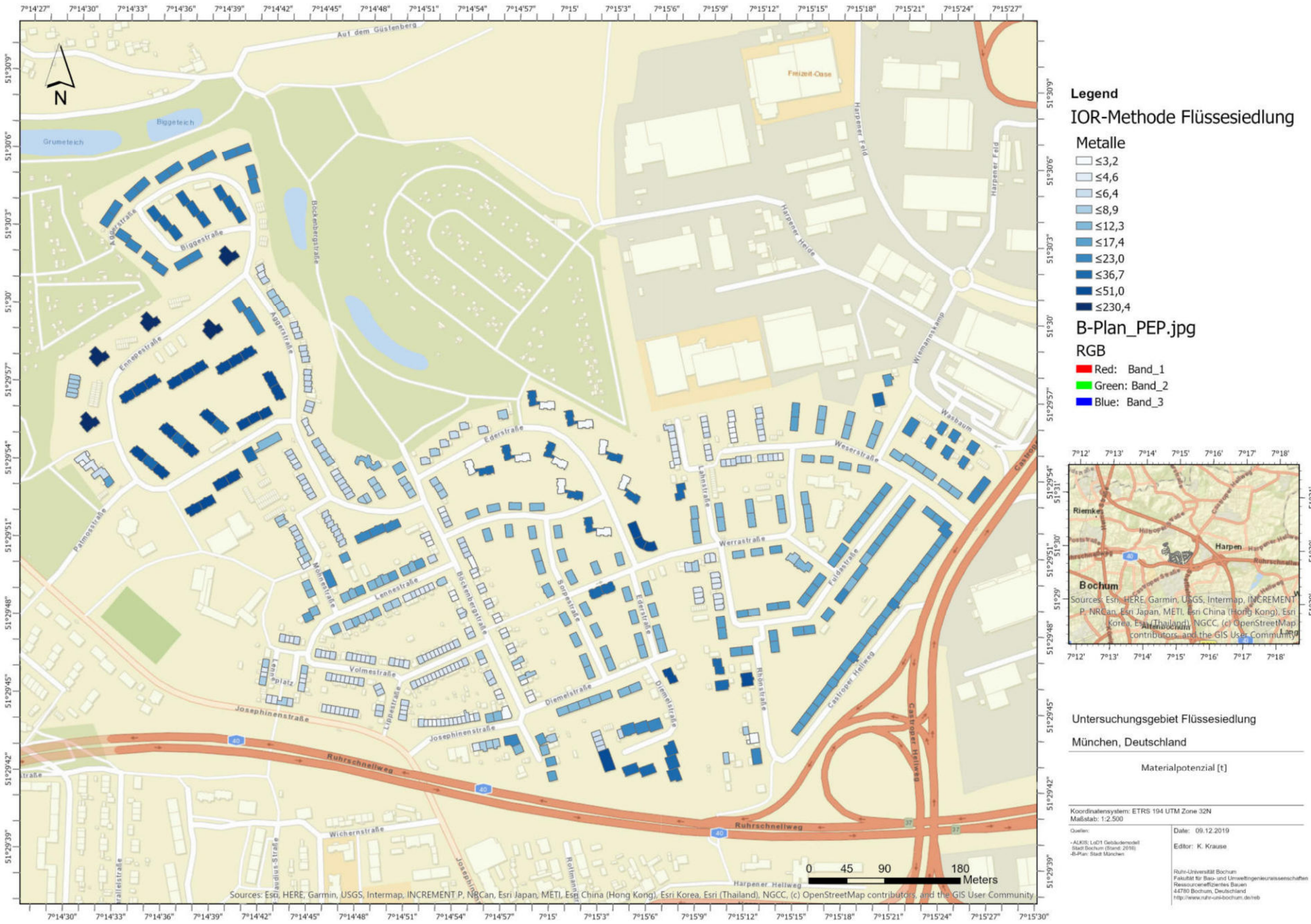
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodel Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend
IOR-Methode Flüssesiedlung
Metalle
≤3,2
≤4,6
≤6,4
≤8,9
≤12,3
≤17,4
≤23,0
≤36,7
≤51,0
≤230,4
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Biggestraße
Aggerstraße
Bockenbergstraße
Ennepestraße
Edersstraße
Weserstraße
Wasbaum
Wiemannskamp
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Patmosstraße
Mohnstraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Josephinenstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
0 45 90 180 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Riemke
Harpen
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
München, Deutschland
Materialpotenzial [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

Legend

IOR-Methode Flüssesiedlung

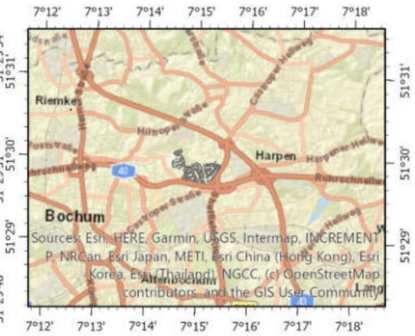
Putze

- ≤18,1
- ≤38,6
- ≤48,7
- ≤58,5
- ≤70,5
- ≤86,2
- ≤105,6
- ≤139,8
- ≤192,4
- ≤403,4

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3



Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

München, Deutschland

Materialpotenzial [t]

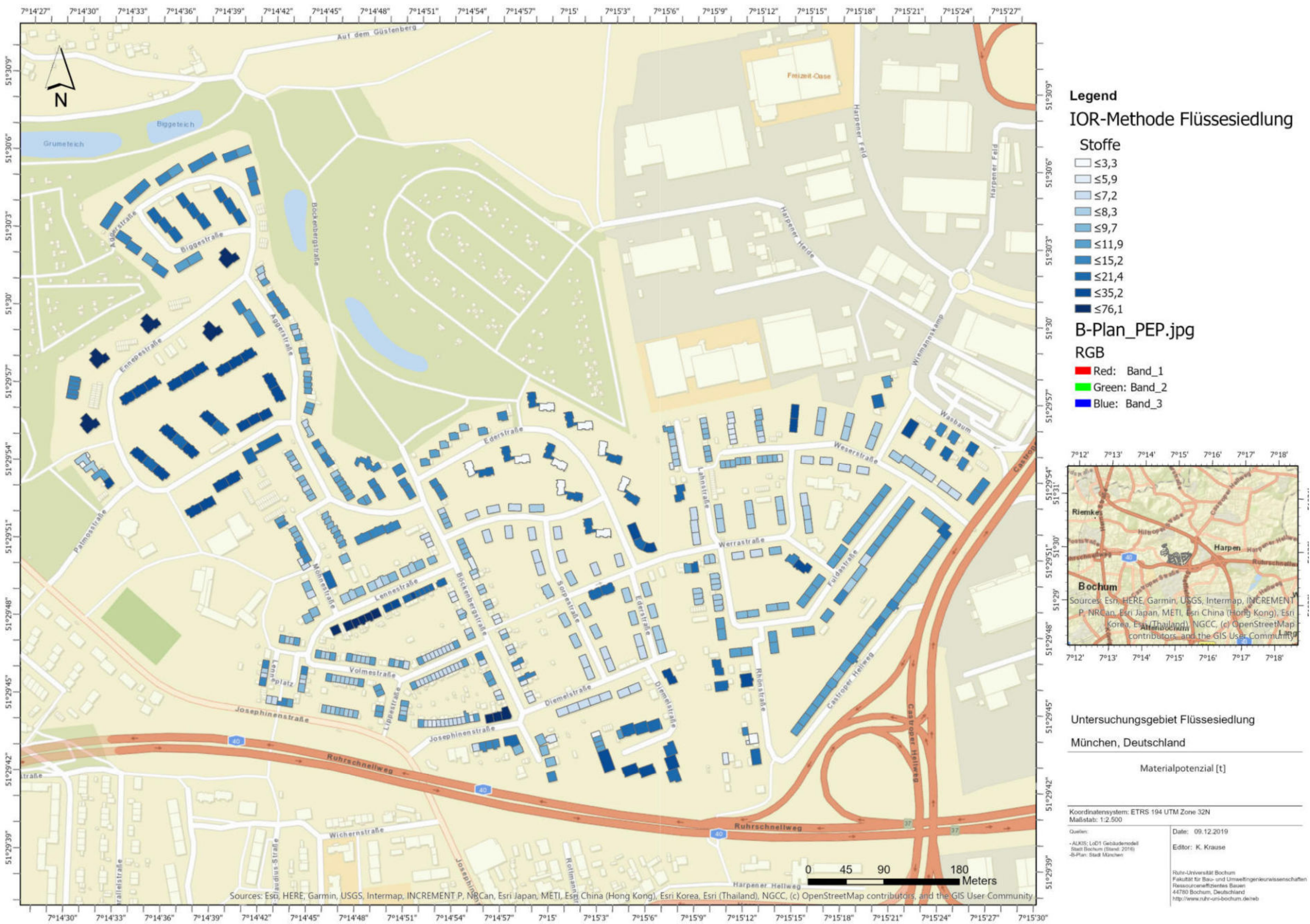
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018)
- B-Plan: Stadt München

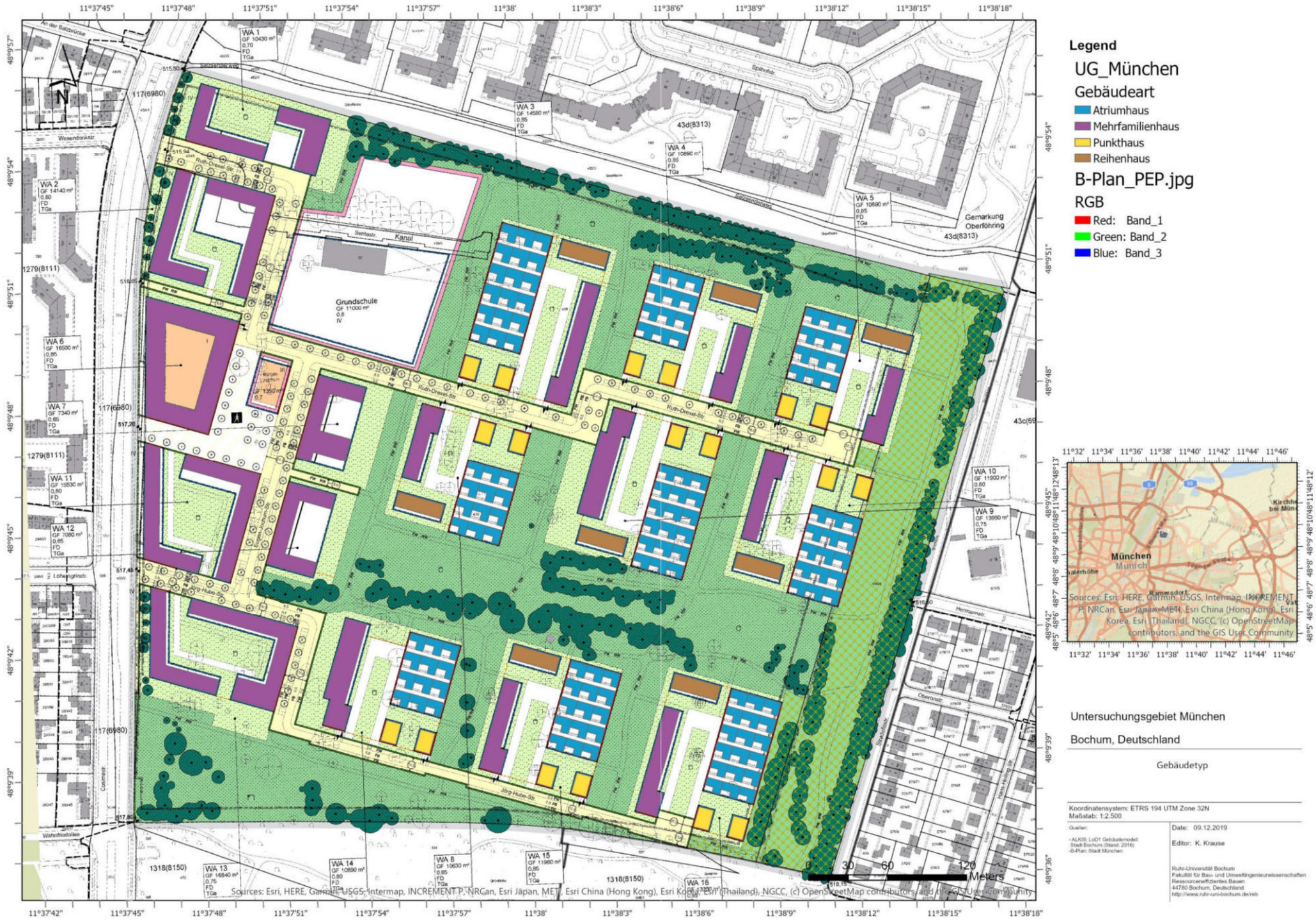
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

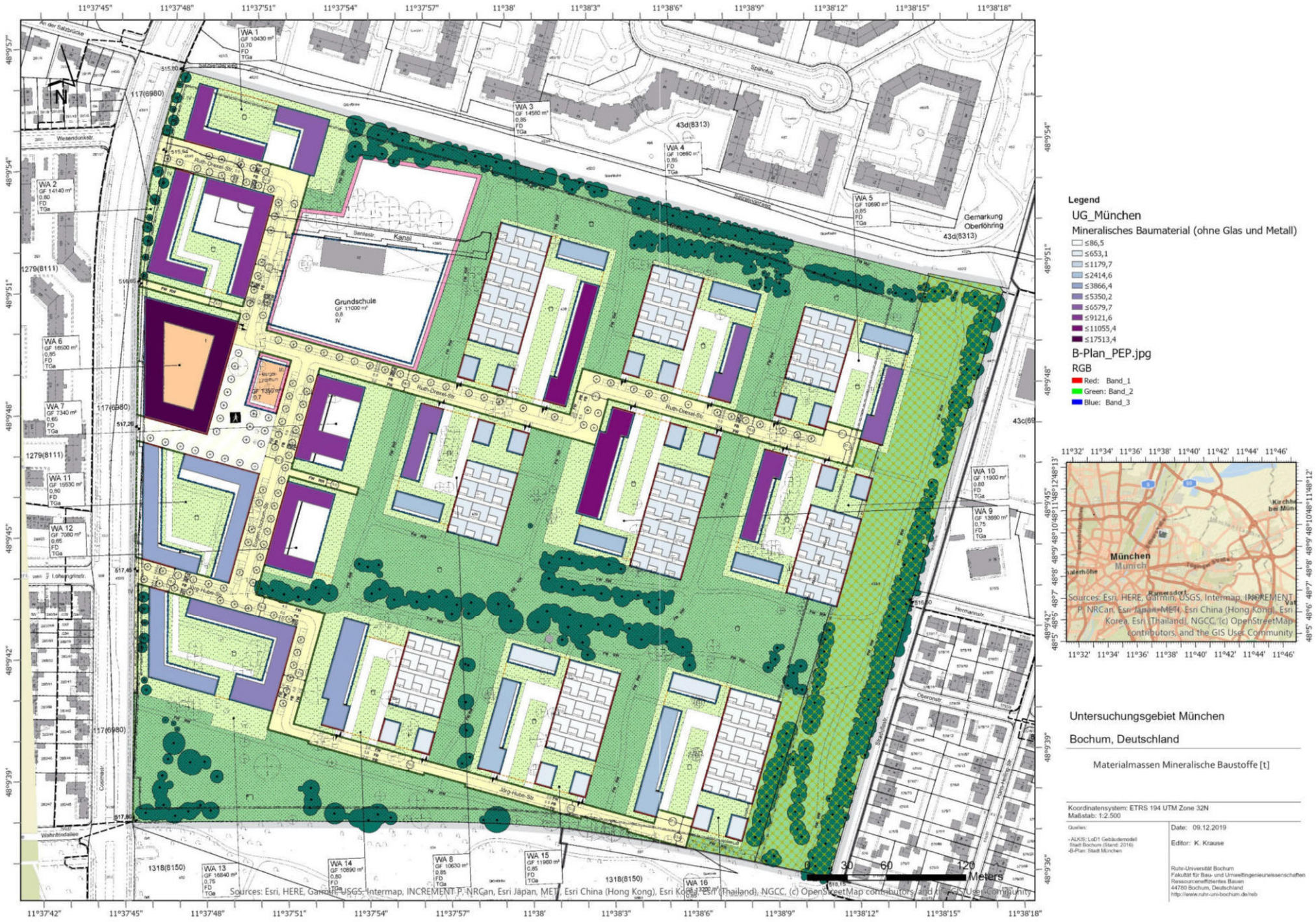
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

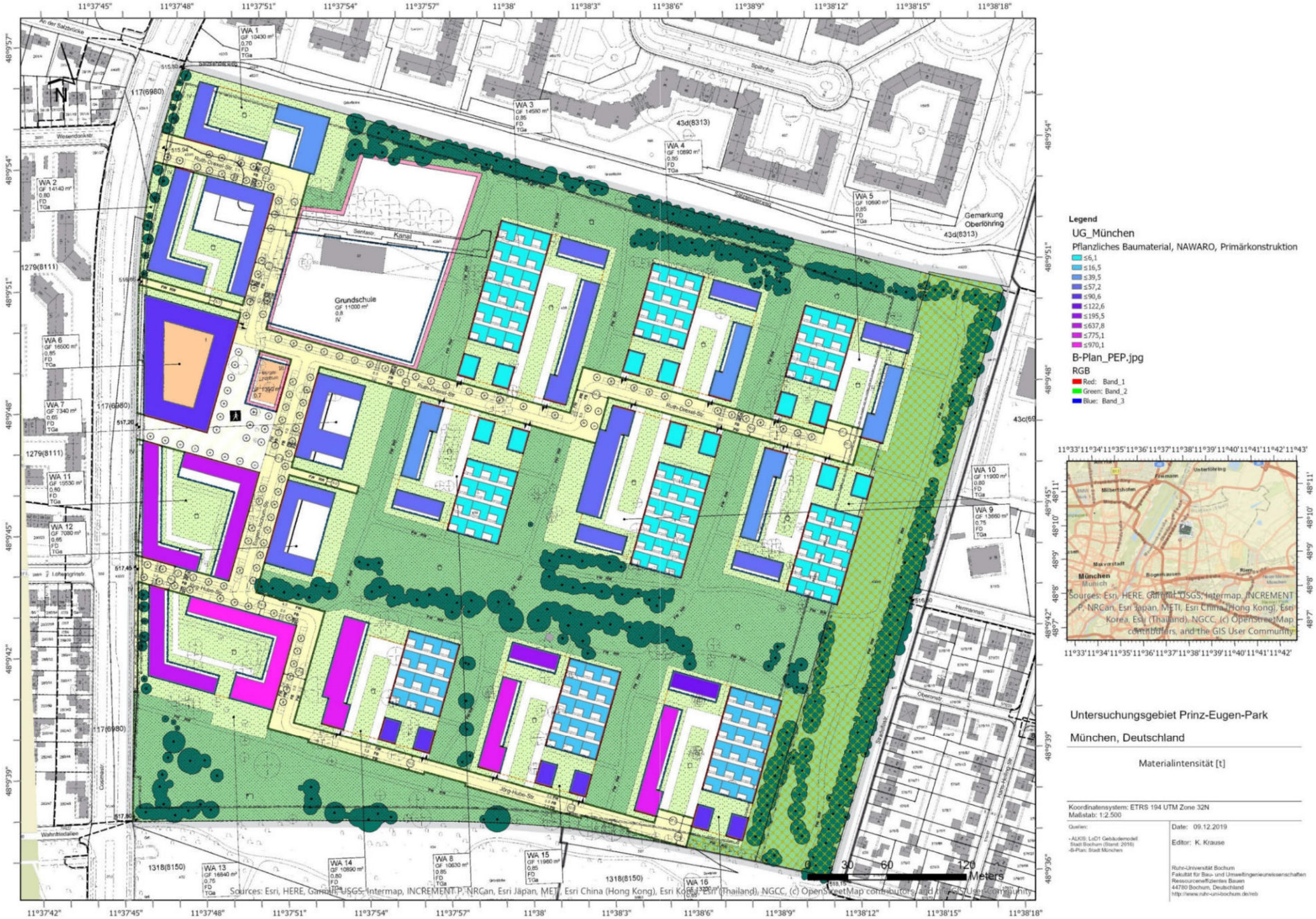

N
Legend
IOR-Methode Flüssesiedlung
Stoffe
≤3,3
≤5,9
≤7,2
≤8,3
≤9,7
≤11,9
≤15,2
≤21,4
≤35,2
≤76,1
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
München, Deutschland
Materialpotenzial [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 45 90 180 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

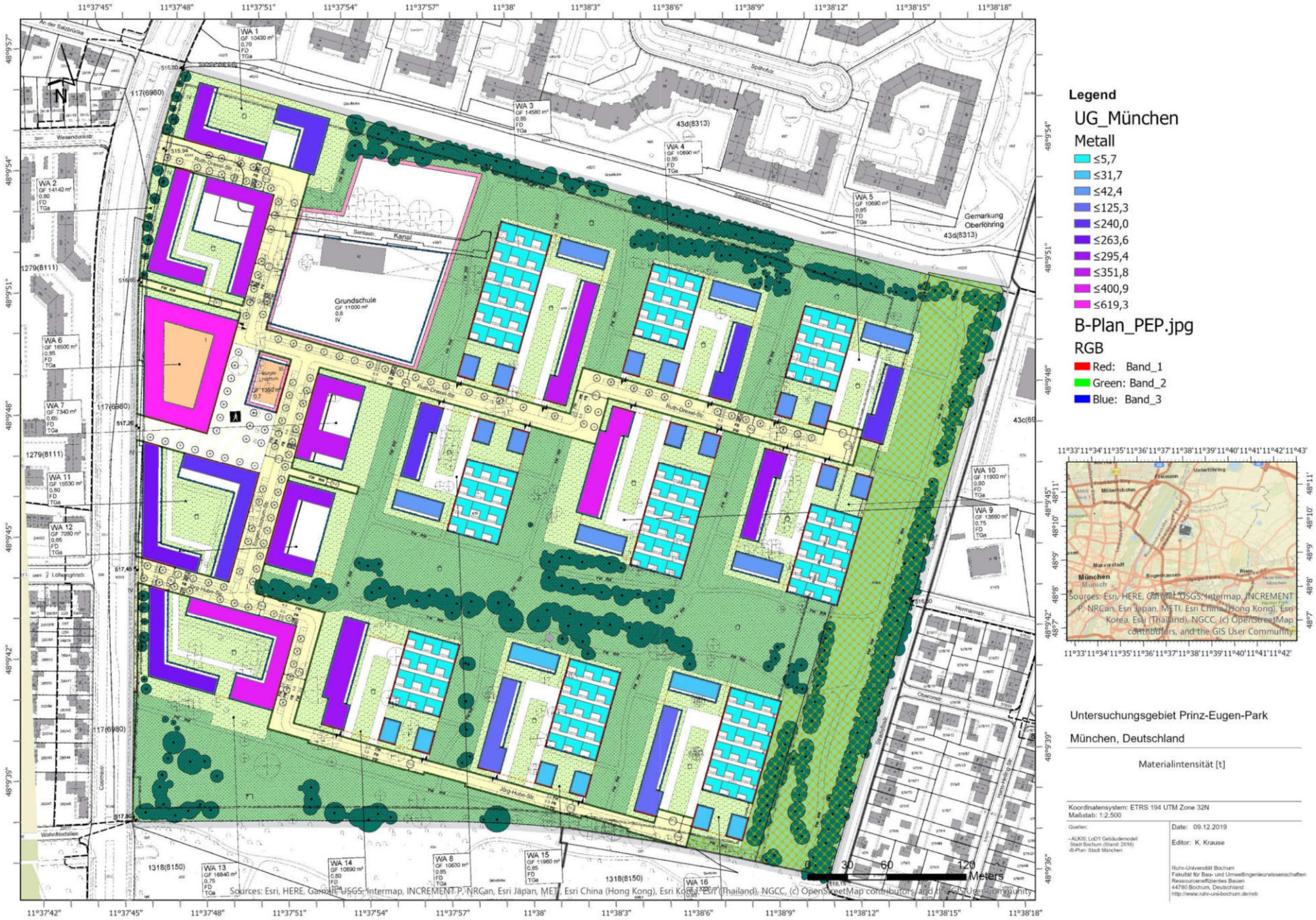
Darstellung der Gebäudetypen für das Untersuchungsgebiet „München“

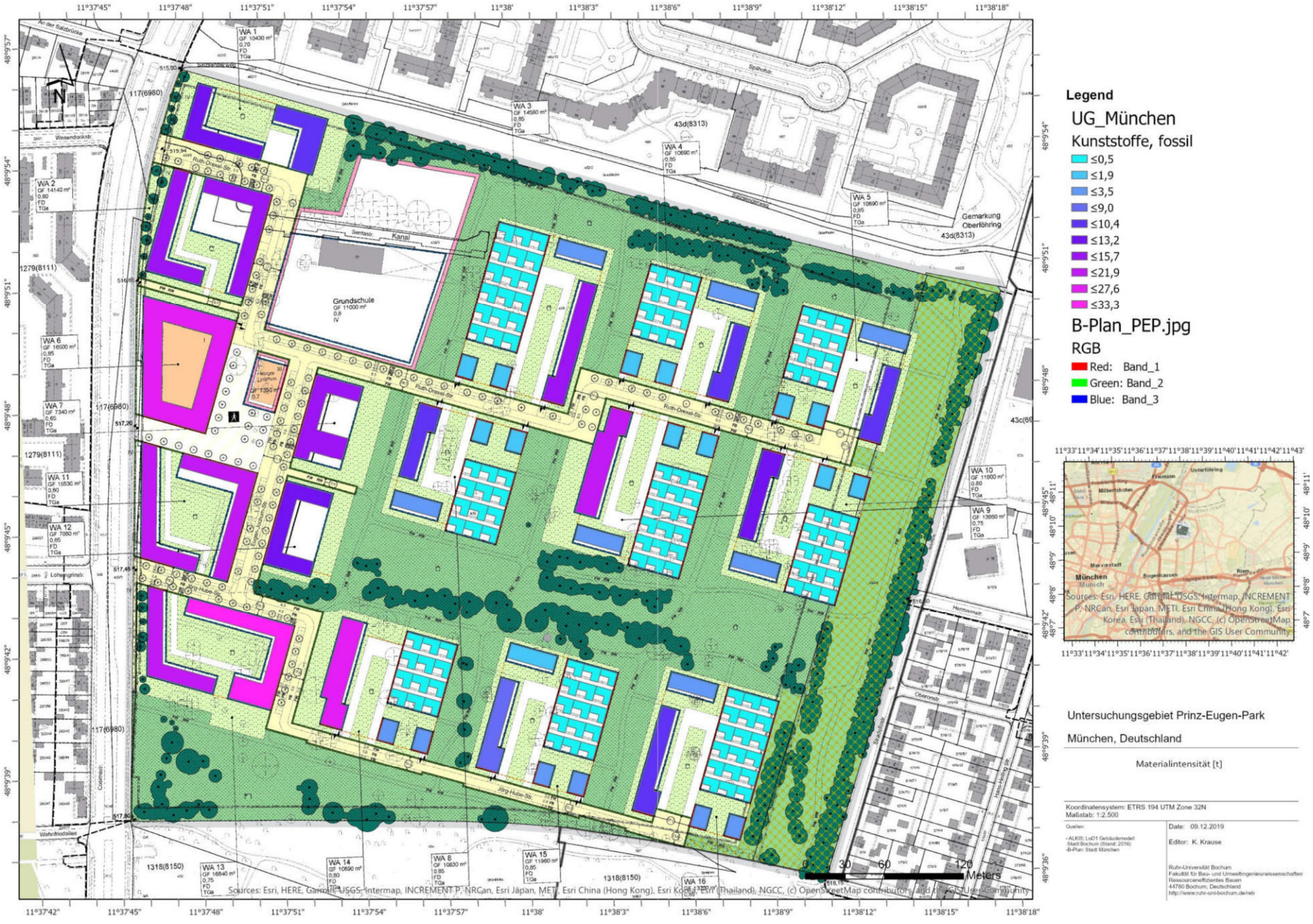


Darstellung der Materialintensitäten für das Untersuchungsgebiet „München“




Legend
UG_München
Pflanzliches Baumaterial, NAWARO, Primärkonstruktion
≤6,1
≤16,5
≤39,5
≤57,2
≤90,6
≤122,6
≤195,5
≤637,8
≤775,1
≤970,1
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Grundschule
Gemarkung Oberföhring
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 30 60 120 Meters


Legend
UG_München
Metall
≤5,7
≤31,7
≤42,4
≤125,3
≤240,0
≤263,6
≤295,4
≤351,8
≤400,9
≤619,3
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 30 60 120 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community


Legend
UG_München
Kunststoffe, fossil
≤0,5
≤1,9
≤3,5
≤9,0
≤10,4
≤13,2
≤15,7
≤21,9
≤27,6
≤33,3
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
0 30 60 120 Meters
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

Legend

UG_München

Transluzente Bauteile, Türrahmen, Türblätter, Fensterrahmen

- ≤0,6
- ≤4,4
- ≤7,0
- ≤21,1
- ≤24,0
- ≤30,5
- ≤33,3
- ≤40,4
- ≤64,0
- ≤87,9

B-Plan_PEP.jpg

RGB

- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3

Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park

München, Deutschland

Materialintensität [t]

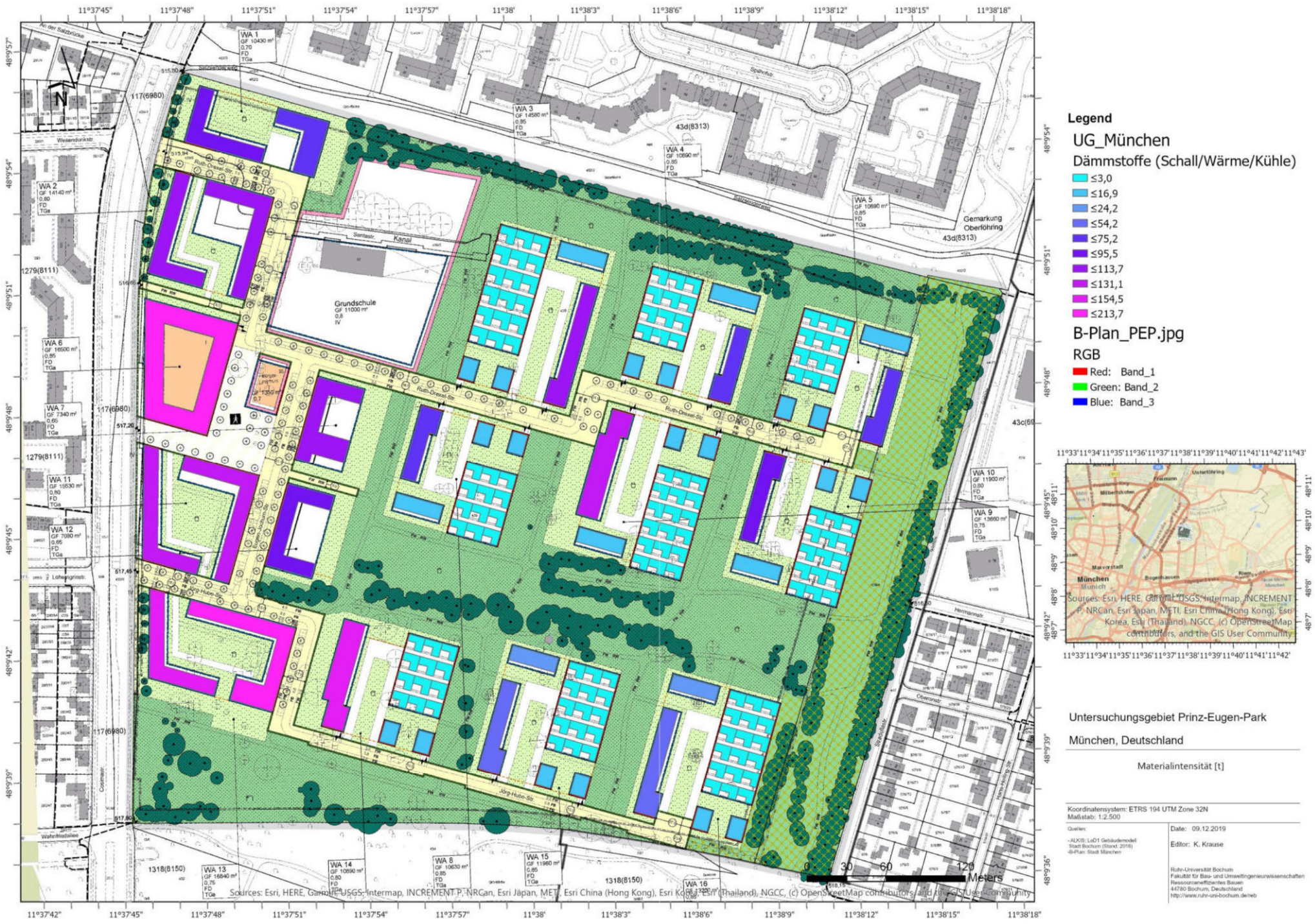
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

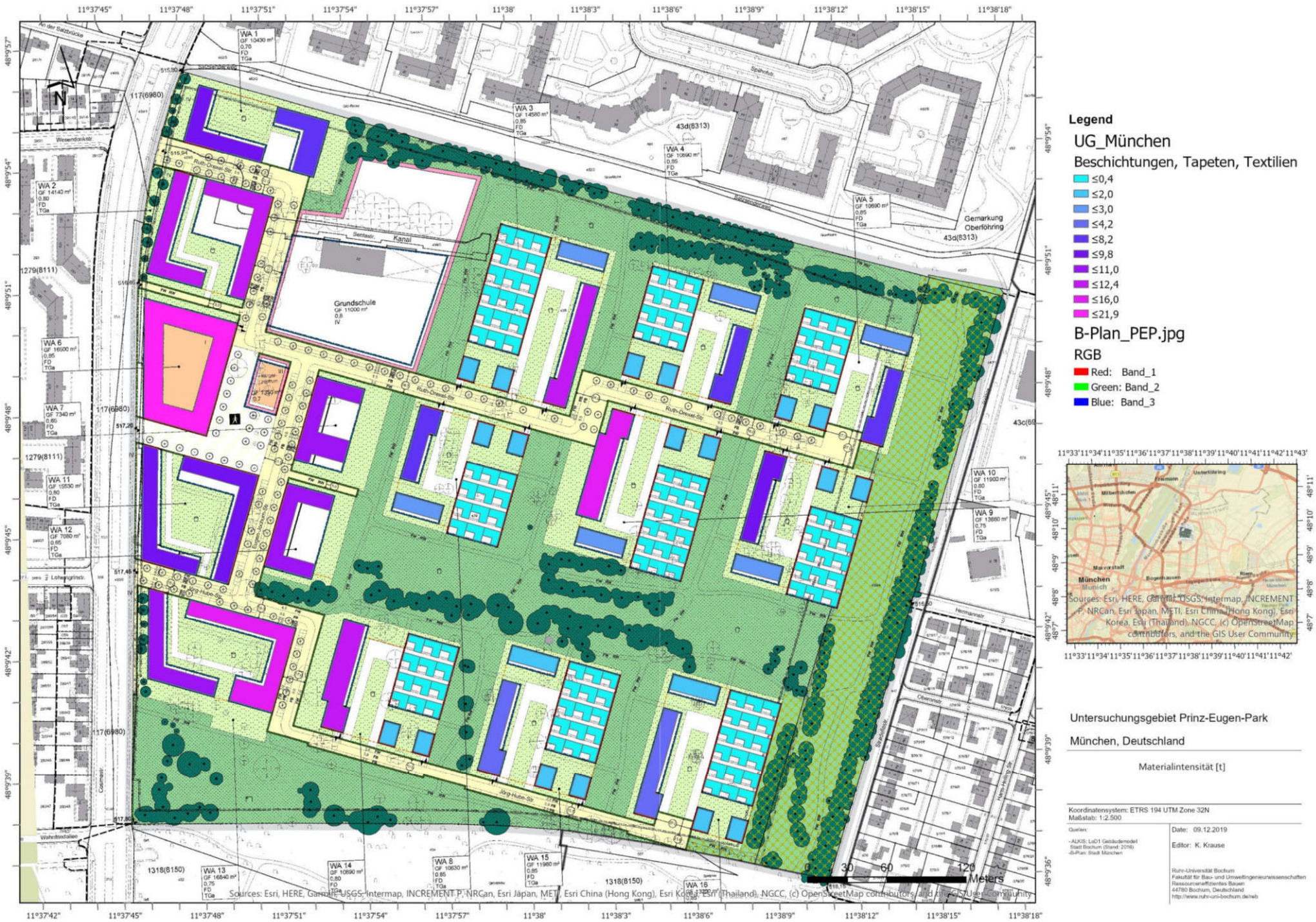
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München

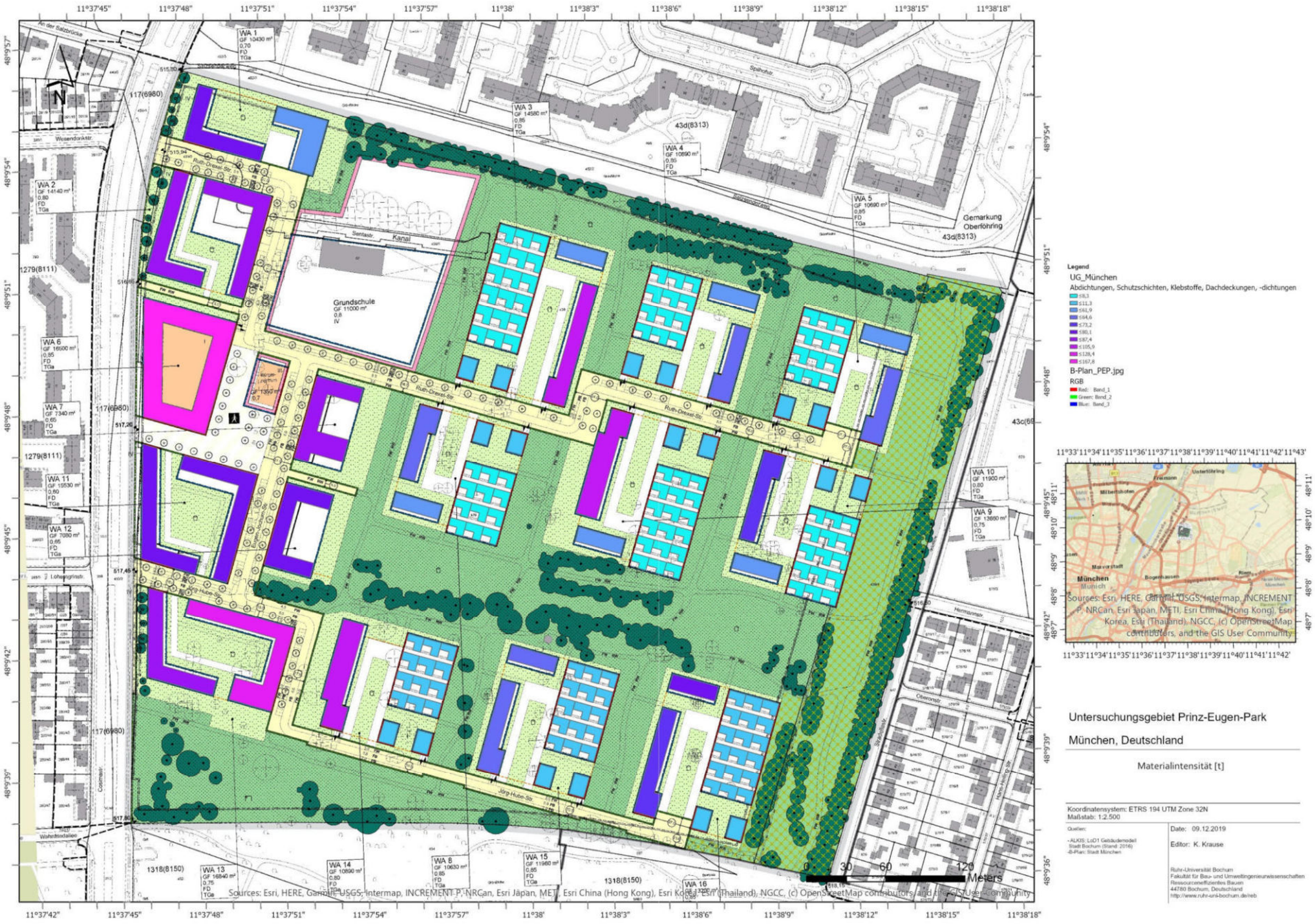
Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb


Legend
UG_München
Dämmstoffe (Schall/Wärme/Kühle)
≤3,0
≤16,9
≤24,2
≤54,2
≤75,2
≤95,5
≤113,7
≤131,1
≤154,5
≤213,7
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
0 30 60 120 Meters
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb


Legend
UG_München
Beschichtungen, Tapeten, Textilien
≤0,4
≤2,0
≤3,0
≤4,2
≤8,2
≤9,8
≤11,0
≤12,4
≤16,0
≤21,9
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 30 60 120 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community



Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park

München, Deutschland

Materialintensität [t]

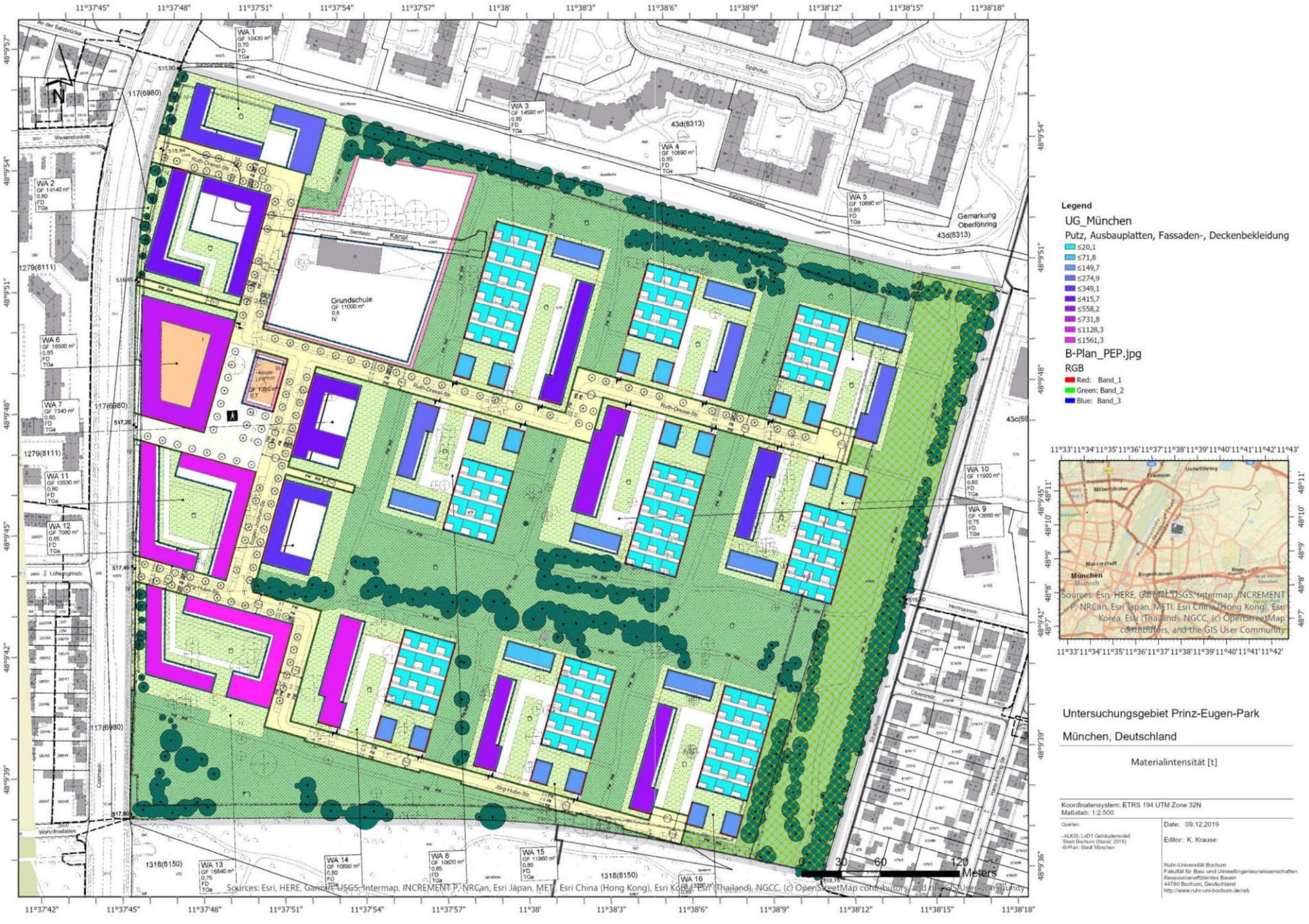
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

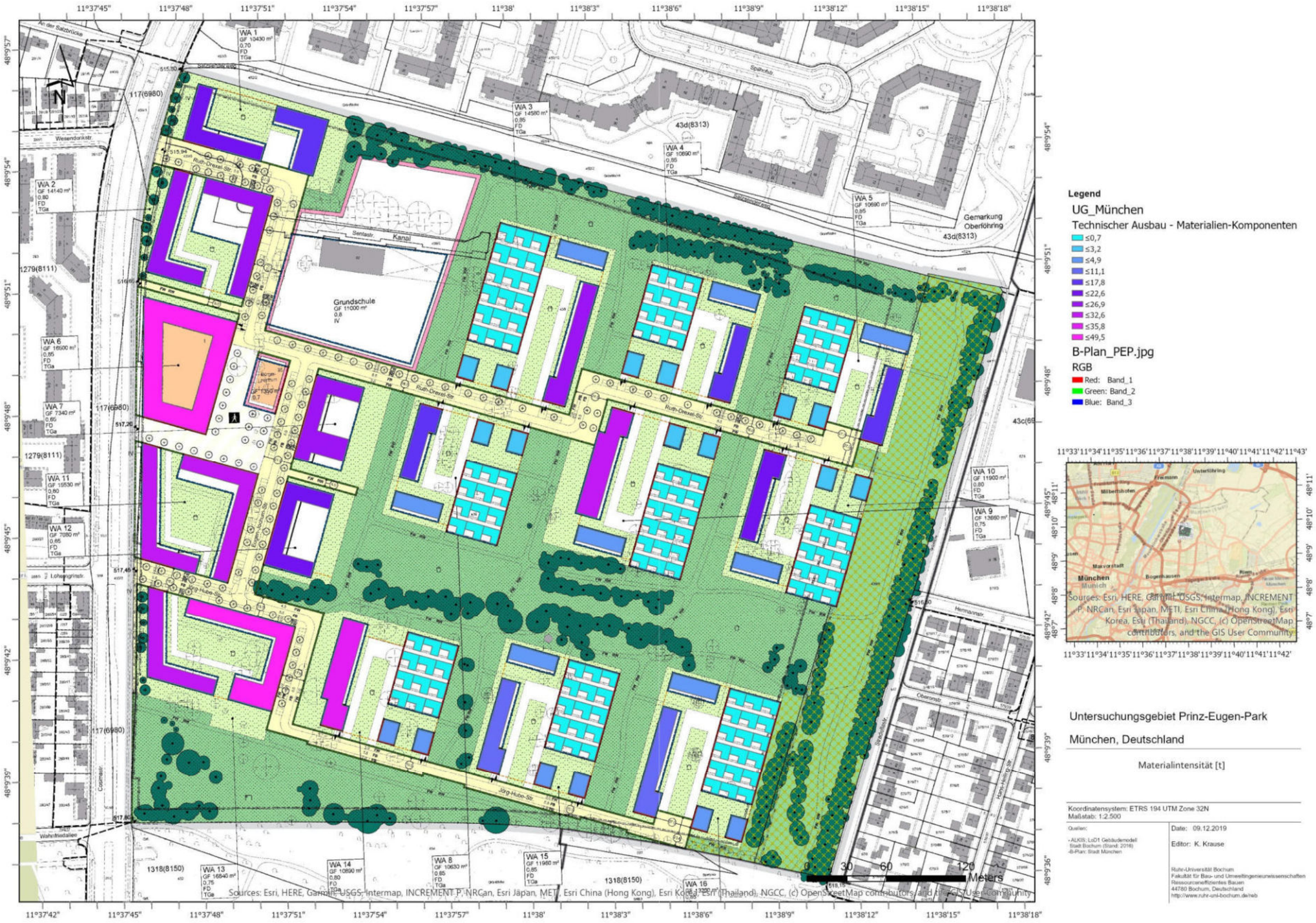
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

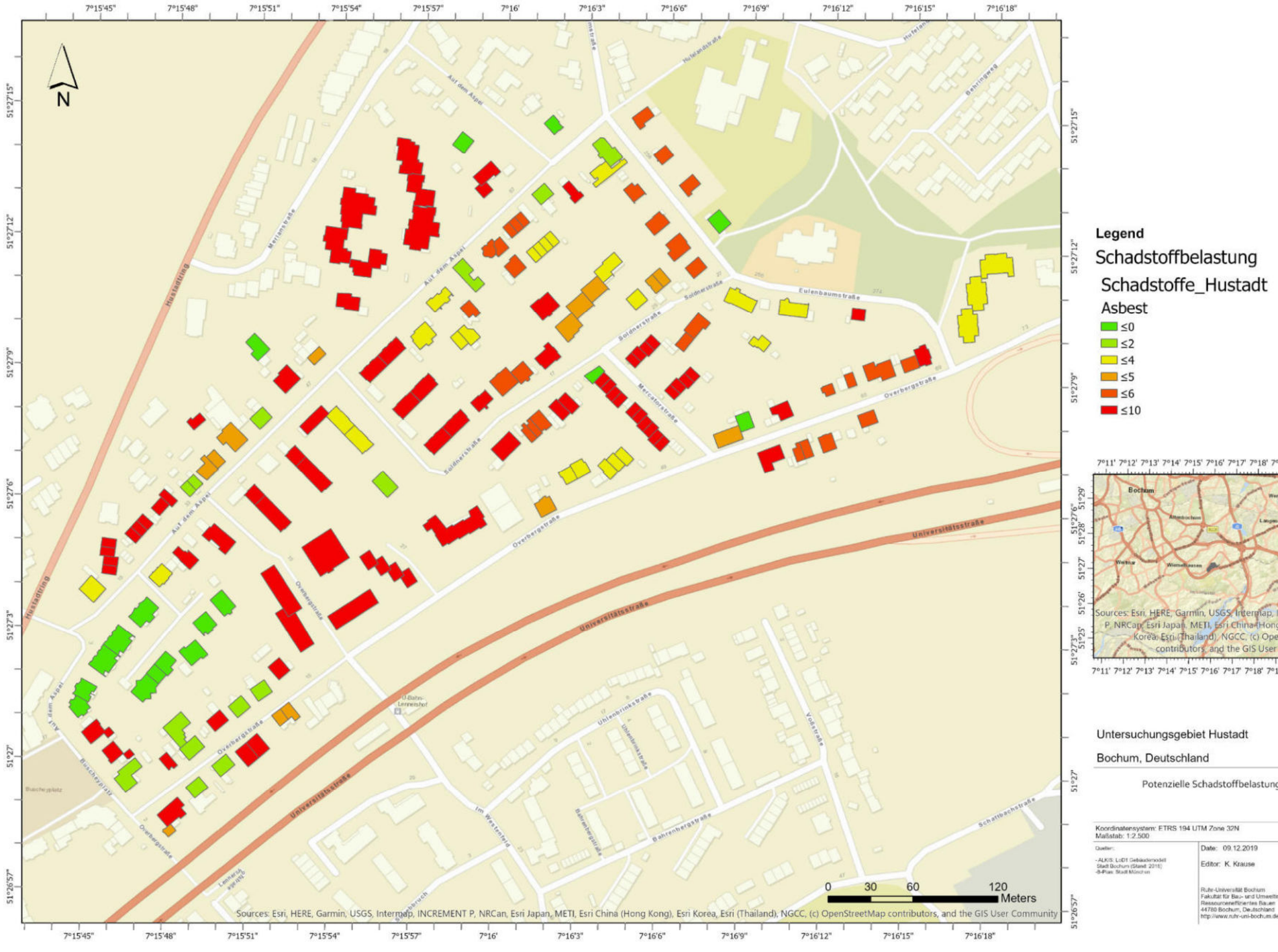
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

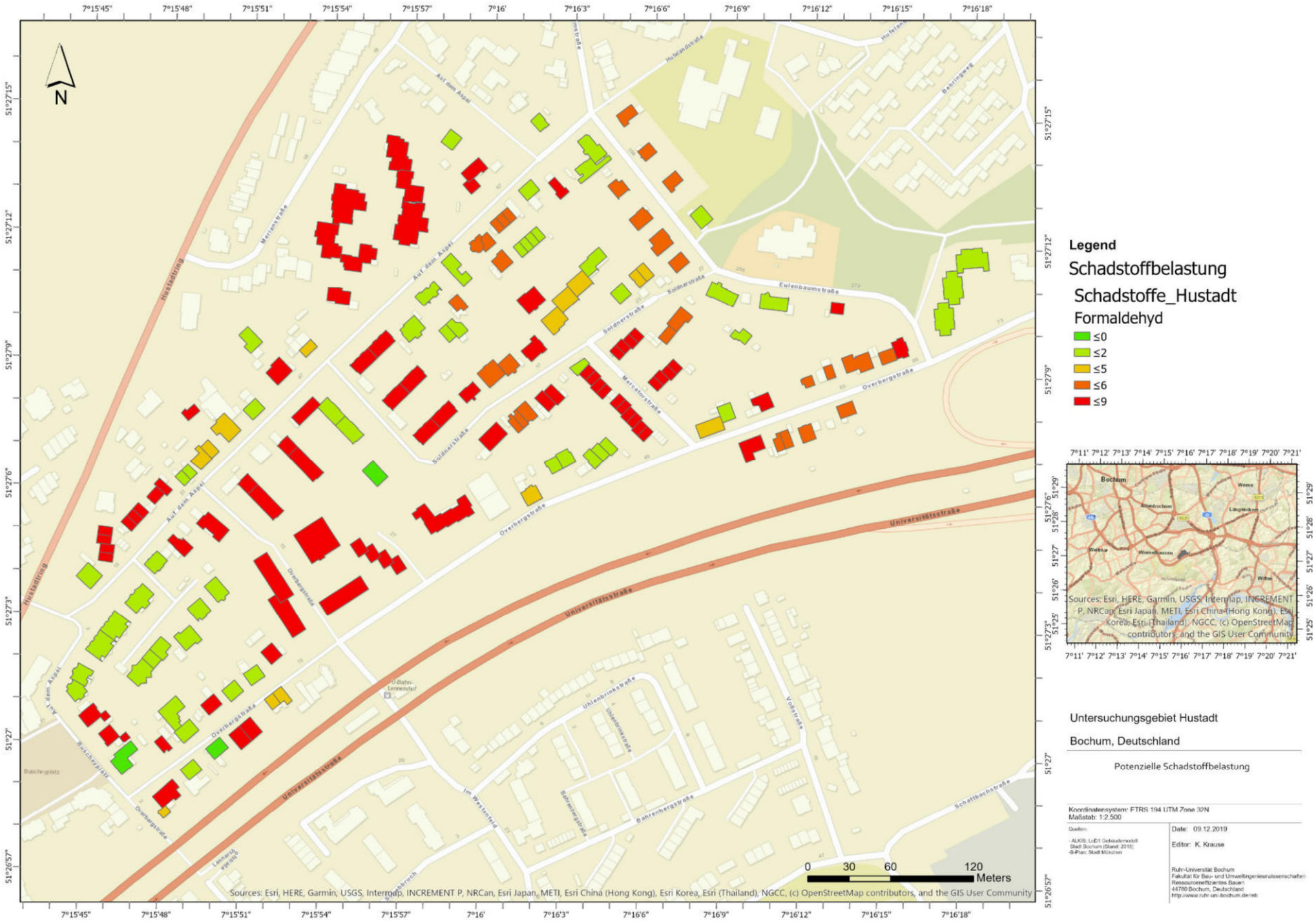

Legend
UG_München
Putz, Ausbauplatten, Fassaden-, Deckenbekleidung
≤20,1
≤71,8
≤149,7
≤274,9
≤349,1
≤415,7
≤558,2
≤731,8
≤1128,3
≤1561,3
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb


Legend
UG_München
Technischer Ausbau - Materialien-Komponenten
≤0,7
≤3,2
≤4,9
≤11,1
≤17,8
≤22,6
≤26,9
≤32,6
≤35,8
≤49,5
B-Plan_PEP.jpg
RGB
Red: Band_1
Green: Band_2
Blue: Band_3
Grundschule
Kanal
Ruth-Drexel-Str.
Jörg-Hube-Str.
Gemarkung Oberföhring
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
0 30 60 120 Meters
Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park
München, Deutschland
Materialintensität [t]
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS; LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

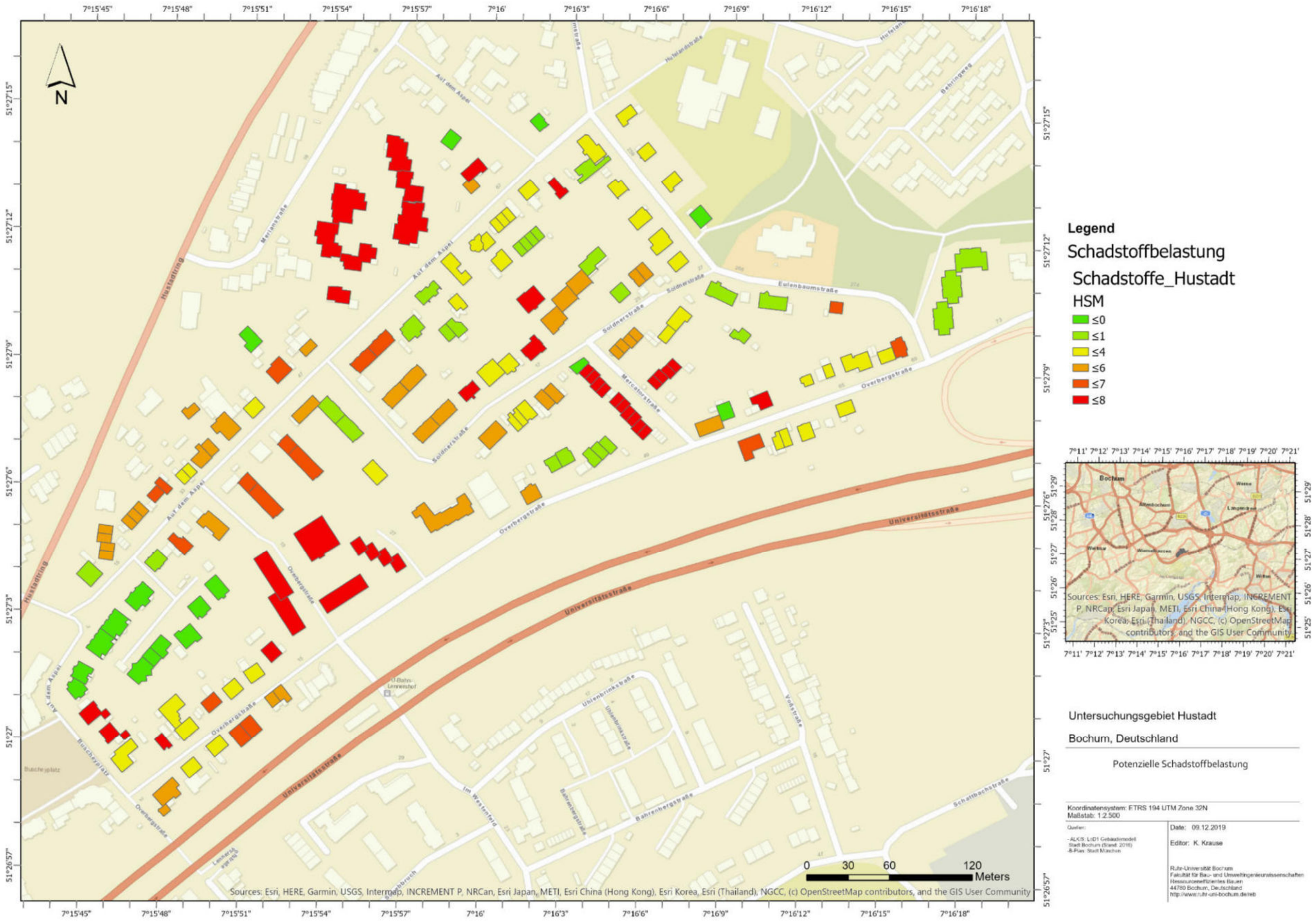
Anhang E

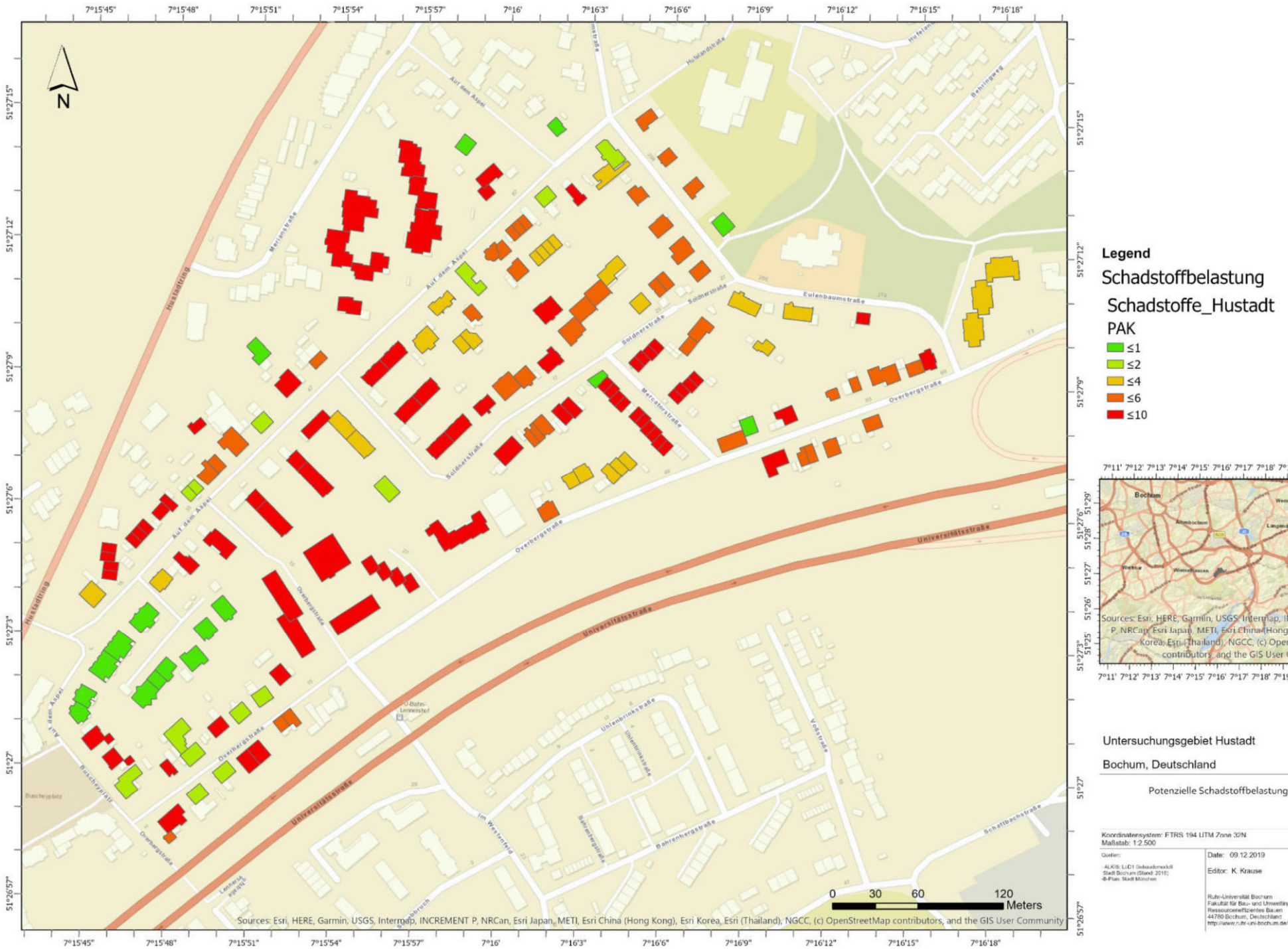
Ergebnisse der Schadstoffbelastungen für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“





N
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Hustadt
Formaldehyd
≤0
≤2
≤5
≤6
≤9
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Behringweg
Uhlenbrinkstraße
Bahrenbergstraße
Im Westenfeld
Schattbachstraße
Voßstraße
Buscheyplatz
Lennerstraße
U-Bahn-Lennershof
0 30 60 120 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Bochum
Weme
Altenbochum
Langendreer
Weitmar
Wiemelhausen
Wittel
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb


N
7°15'45"
7°15'48"
7°15'51"
7°15'54"
7°15'57"
7°16'
7°16'3"
7°16'6"
7°16'9"
7°16'12"
7°16'15"
7°16'18"
51°27'15"
51°27'12"
51°27'9"
51°27'6"
51°27'3"
51°27'
51°26'57"
Hustadtring
Auf dem Aspei
Merianstraße
Soldnerstraße
Overbergstraße
Universitätsstraße
Eulenbaumstraße
Mercatorstraße
Hofelandstraße
Behringweg
Unienbrinkstraße
Vonstraße
Bahrenbergstraße
Schattbachstraße
Buscheystraße
Lessingstraße
Im Westerholt
U-Bahn-Unnenhof
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Hustadt
HSM
≤0
≤1
≤4
≤6
≤7
≤8
7°11' 7°12' 7°13' 7°14' 7°15' 7°16' 7°17' 7°18' 7°19' 7°20' 7°21'
51°29'
51°28'
51°27'
51°26'
51°25'
Bochum
Wattenscheid
Hattingen
Witten
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Legend

Schadstoffbelastung

Schadstoffe_Hustadt

PAK

- ≤1
- ≤2
- ≤4
- ≤6
- ≤10

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Potenzielle Schadstoffbelastung

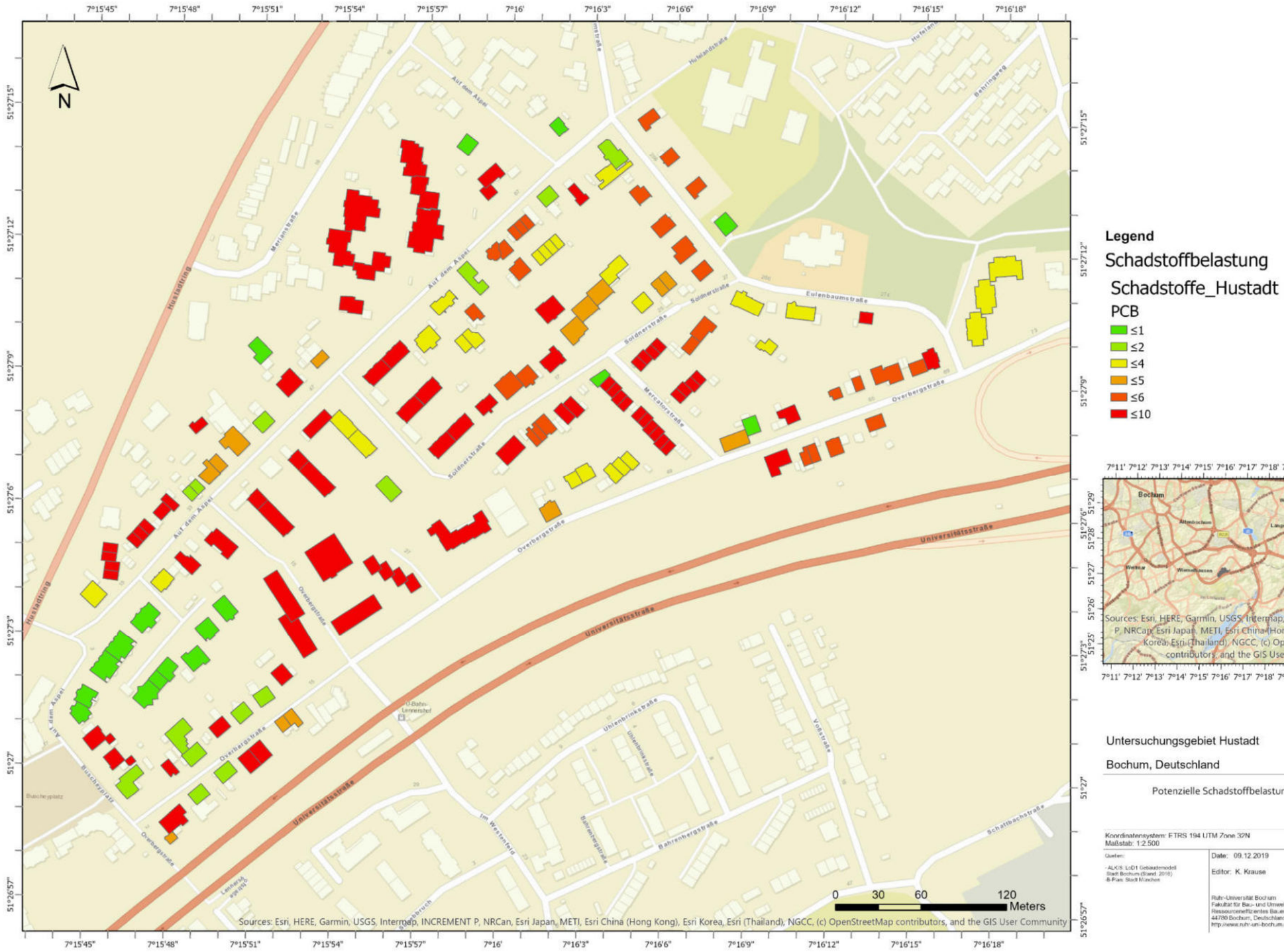
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018)
- B-Plan: Stadt München

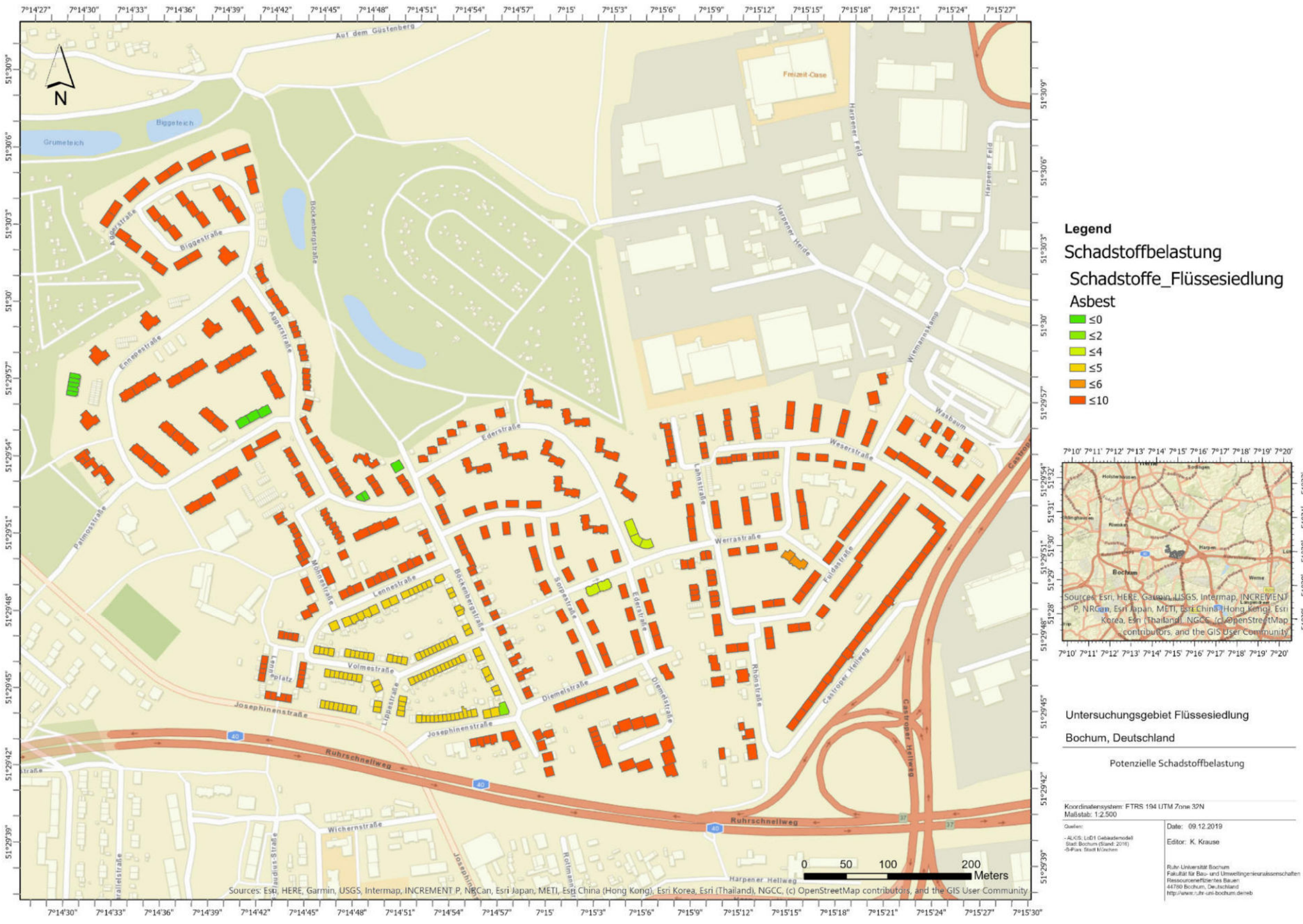
Date: 09.12.2019

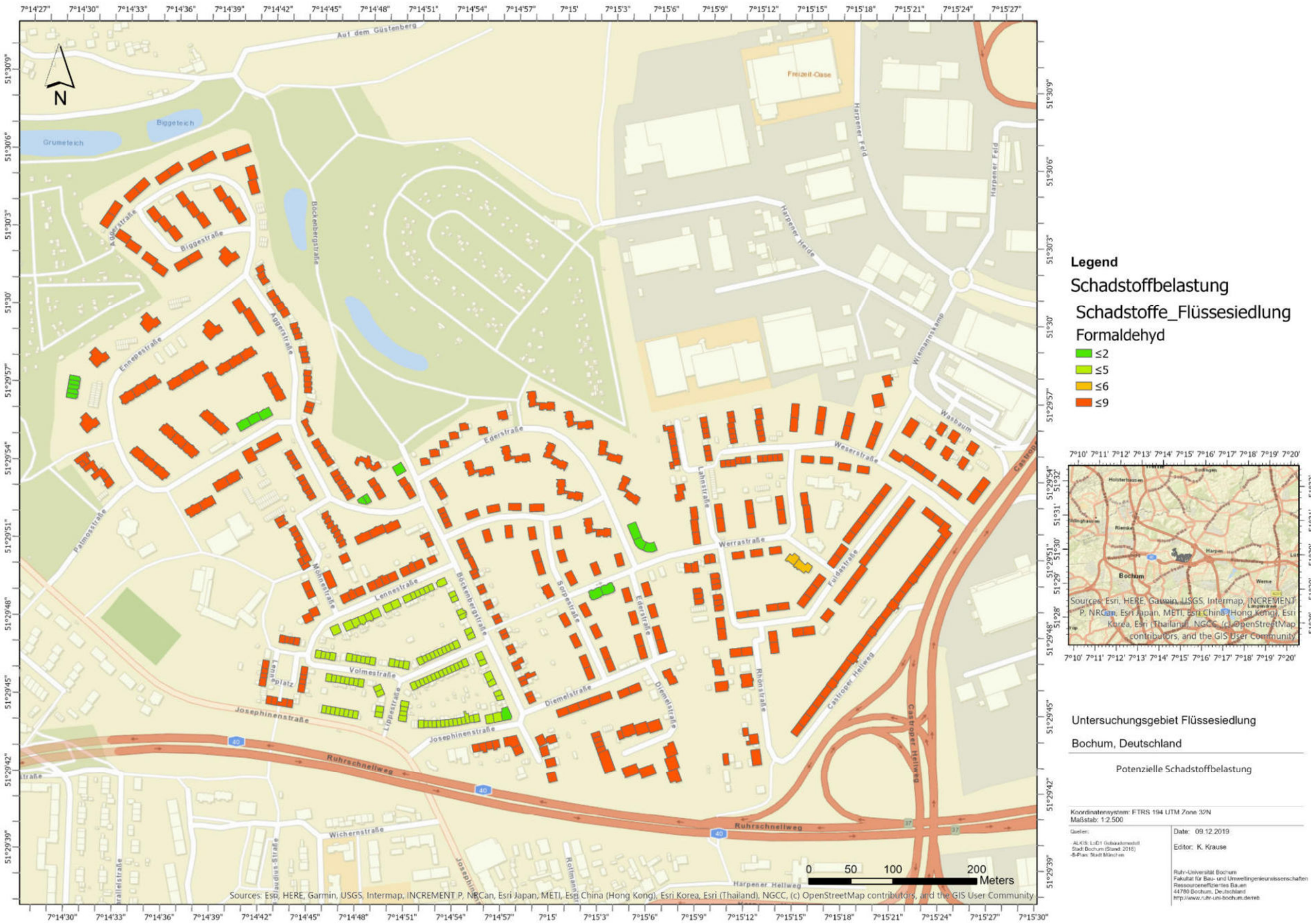
Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

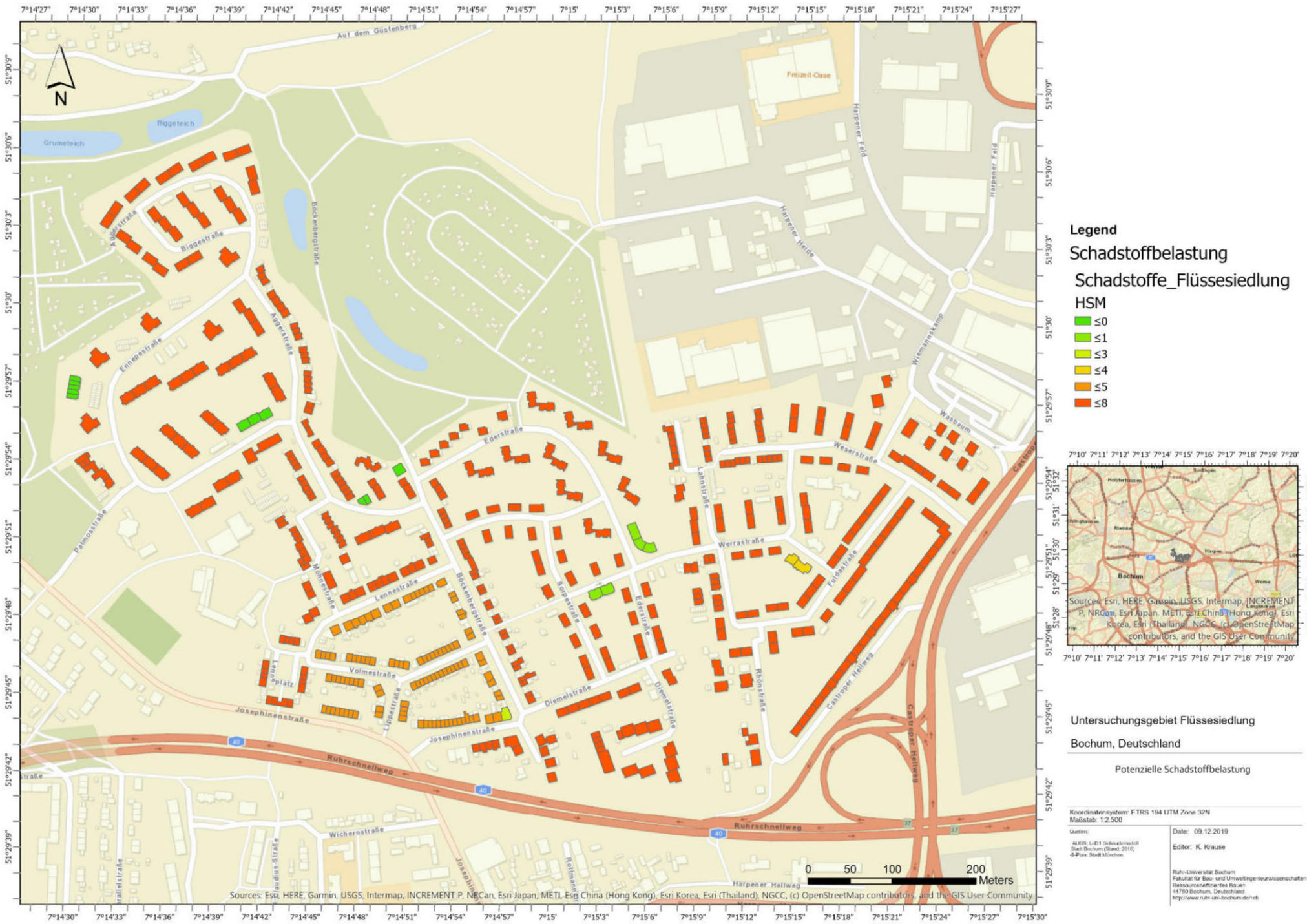


N
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Hustadt
PCB
≤1
≤2
≤4
≤5
≤6
≤10
Universitätsstraße
Hustadtring
Overbergstraße
Soldnerstraße
Mercatorstraße
Eulenbaumstraße
Bahrenbergstraße
Uhlenbrinkstraße
Schattbachstraße
Im Westenfeld
Auf dem Aspel
Merianstraße
Hufelandstraße
Bahringweg
Buscheyplatz
0 30 60 120
Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Hustadt
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

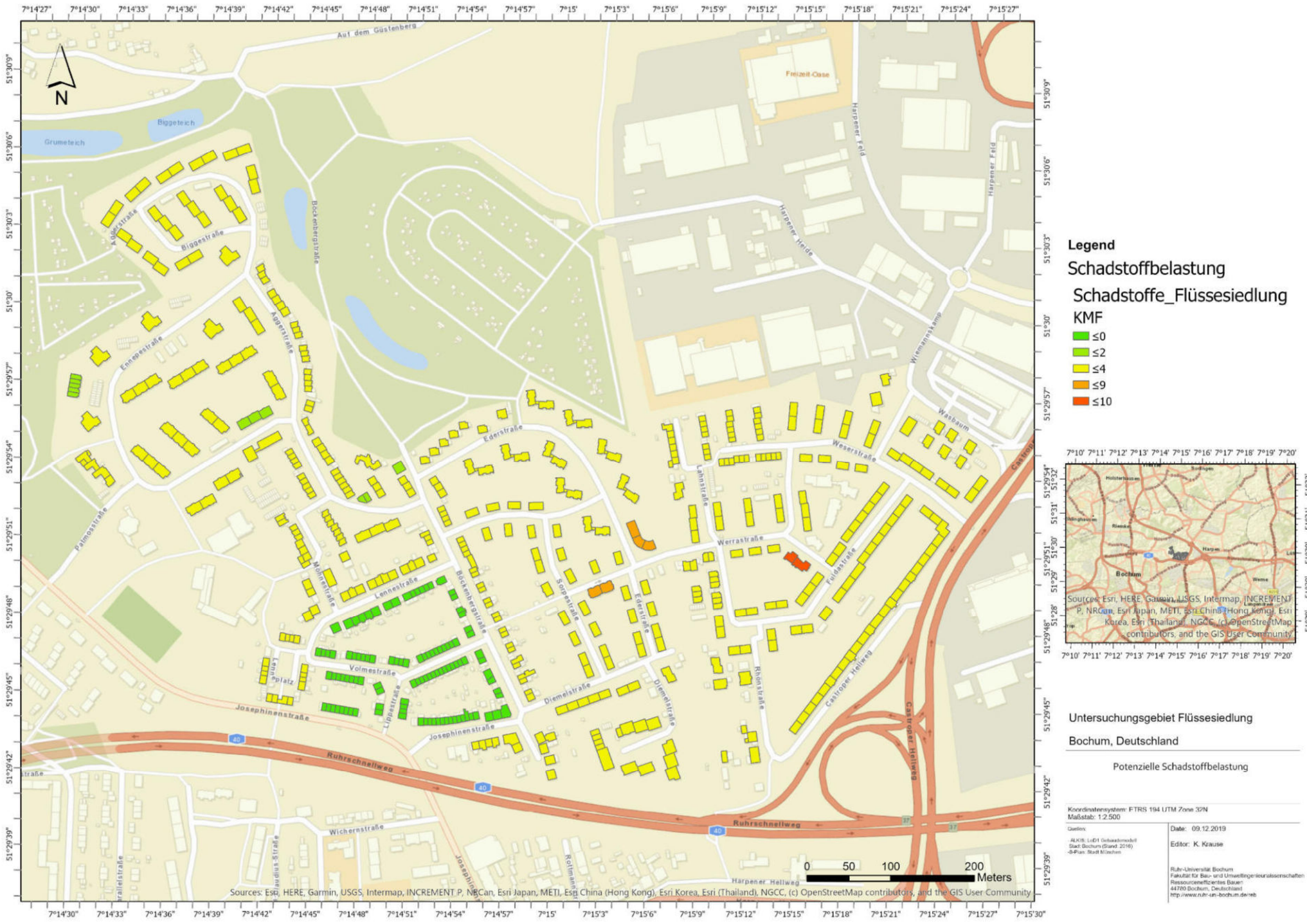

Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
Asbest
≤0
≤2
≤4
≤5
≤6
≤10
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community



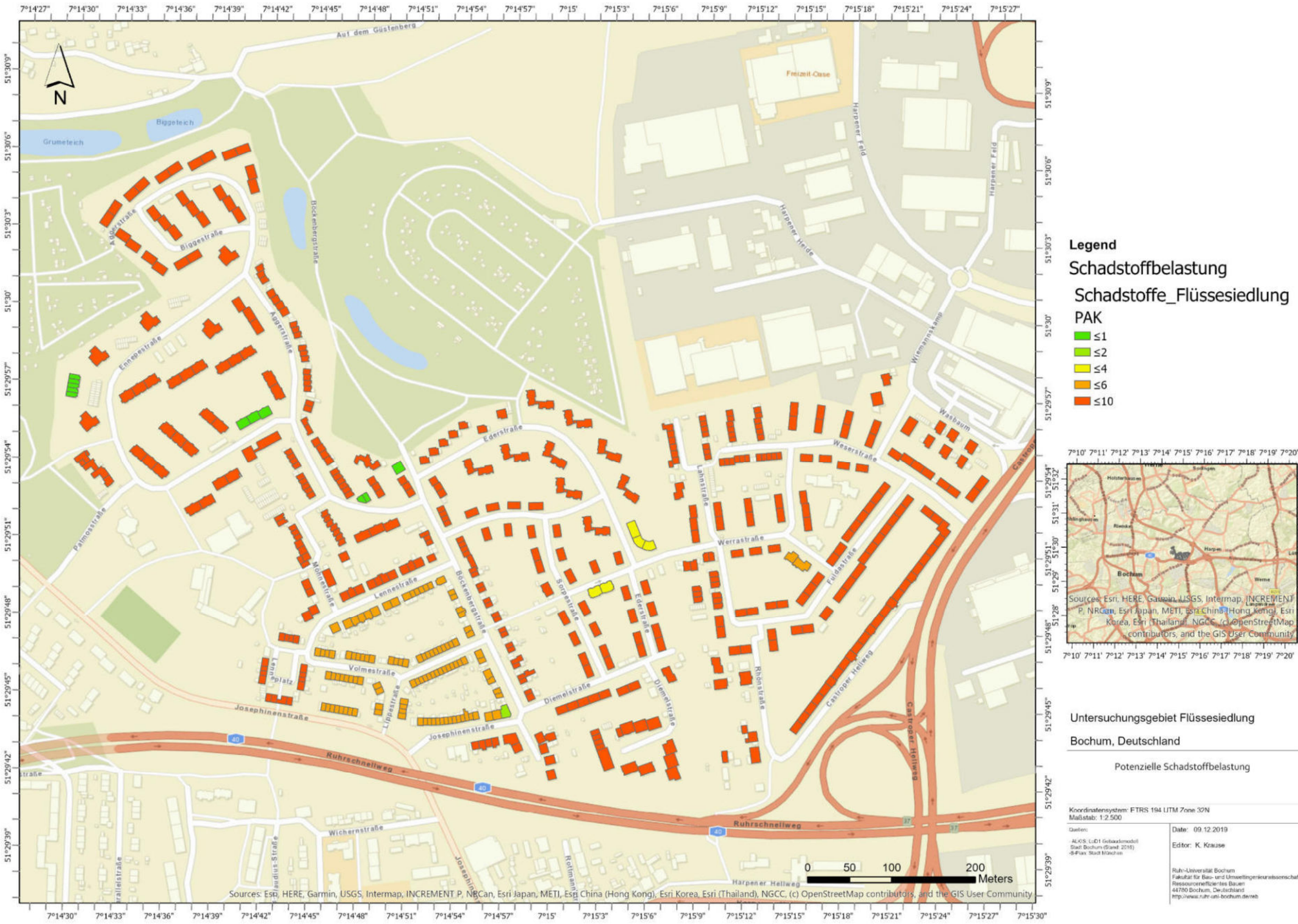
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
Formaldehyd
≤2
≤5
≤6
≤9
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Biggestraße
Aggerstraße
Bockenbergstraße
Ennepestraße
Patmosstraße
Ederstraße
Weserstraße
Wasbaum
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Lennestraße
Mohnstraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Castroper Hellweg
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
Bochum

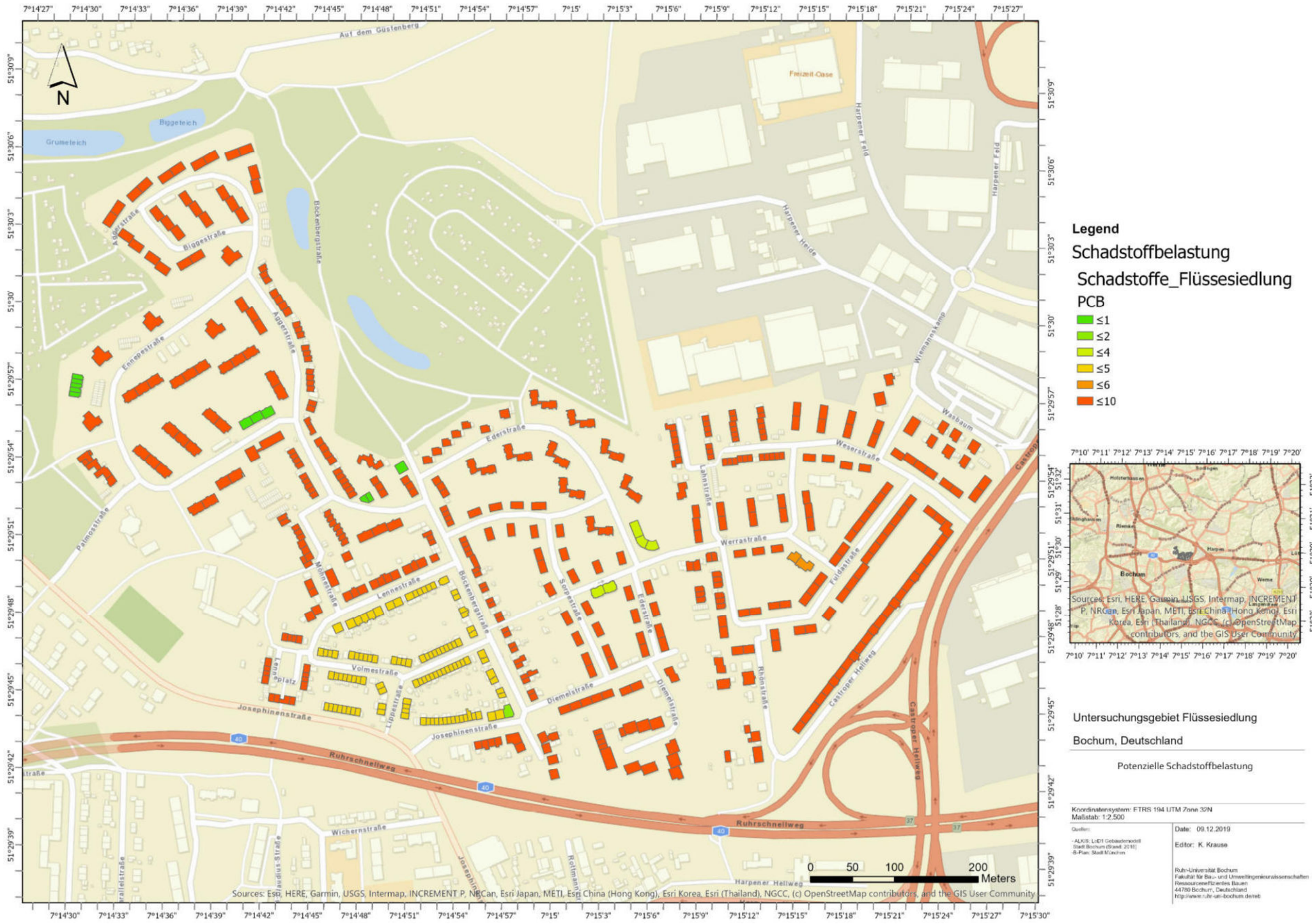


N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Biggestraße
Aggerstraße
Böckenbergstraße
Ennepestraße
Edersstraße
Weserstraße
Wasbaum
Wiemannskamp
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Palmosstraße
Mohnestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Castroper Hellweg
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
HSM
≤0
≤1
≤3
≤4
≤5
≤8
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2016)
-B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



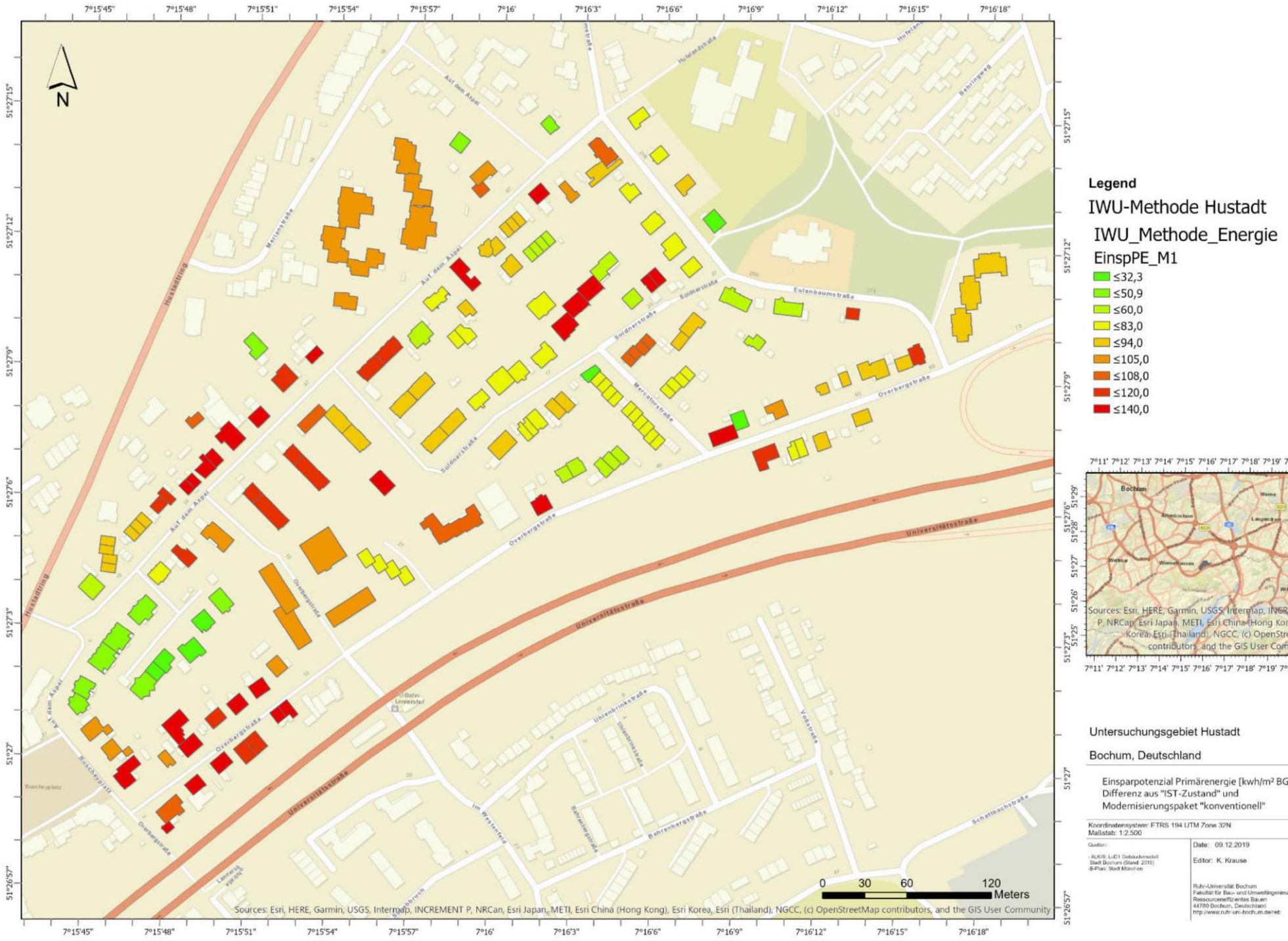
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
KMF
≤0
≤2
≤4
≤9
≤10
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Biggestraße
Aggerstraße
Bockenbergstraße
Ennepestraße
Edersstraße
Weserstraße
Wasbaum
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Patmosstraße
Mohnestraße
Lennestraße
Sorpestraße
Volmestraße
Diemelstraße
Rhönstraße
Castroper Hellweg
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
Bochum

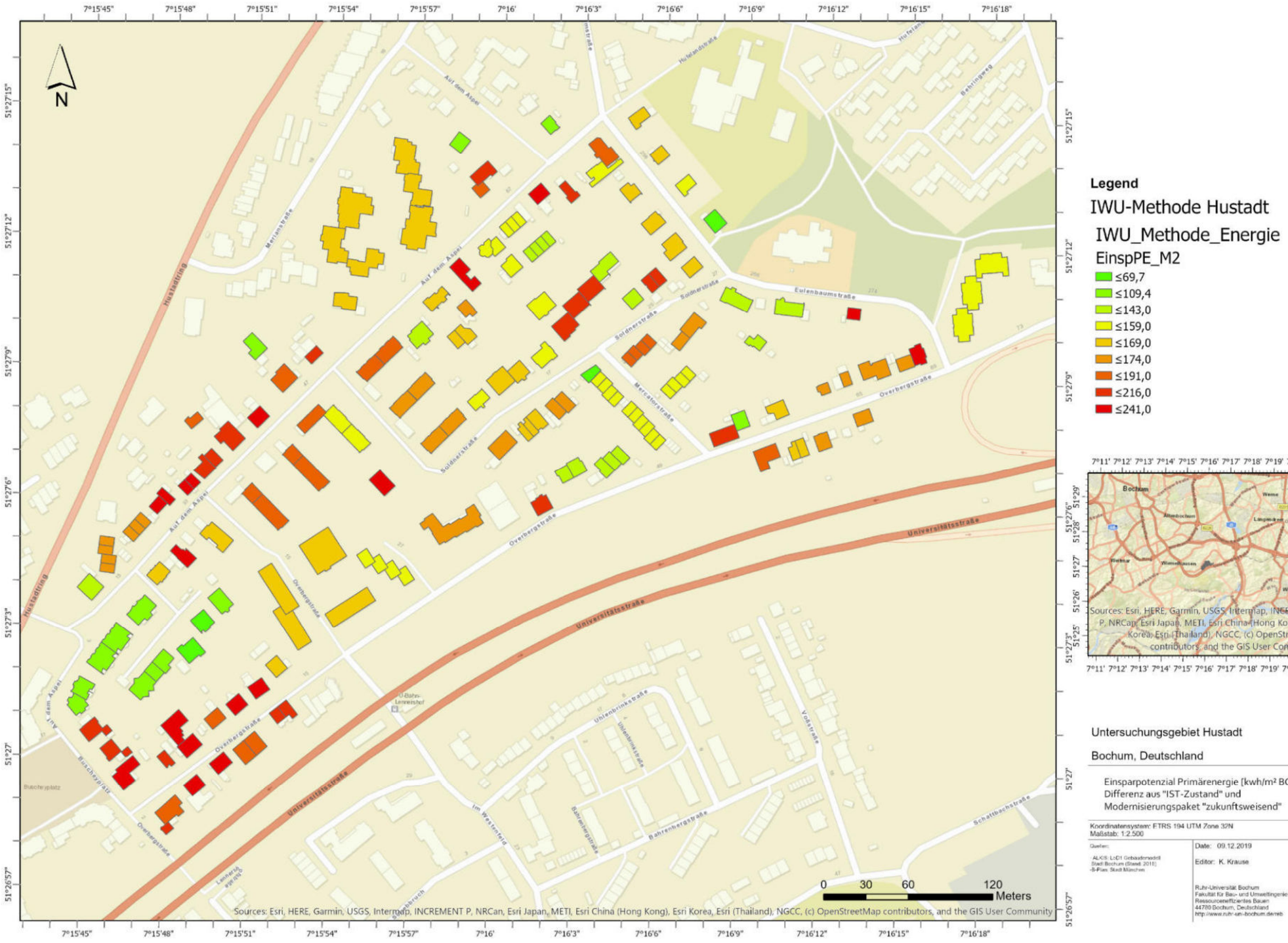

N
Auf dem Güstenberg
Freizeit-Oase
Biggeteich
Grumeteich
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Washaus
Böckenbergstraße
Biggestraße
Adolfstraße
Ennenestraße
Aggerstraße
Ederstraße
Weserstraße
Lahnstraße
Palmostraße
Wohnestraße
Lennestraße
Werrastraße
Fuldastraße
Sorpestraße
Ederstraße
Rhönstraße
Volmestraße
Lippestraße
Diemelstraße
Josephinenstraße
Castroper Hellweg
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Harpener Hellweg
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
PAK
≤1
≤2
≤4
≤6
≤10
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
-BiPlan- Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb


Auf dem Güstenberg
Grumeteich
Biggeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Washaus
Ederstraße
Weserstraße
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Castroper Hellweg
Rhönstraße
Diemelstraße
Sorpestraße
Bockenbergstraße
Lennestraße
Volmestraße
Lippestraße
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Palmostraße
Agnesstraße
Biggestraße
Ennepestraße
Harpener Hellweg
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Legend
Schadstoffbelastung
Schadstoffe_Flüssesiedlung
PCB
≤1
≤2
≤4
≤5
≤6
≤10
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Potenzielle Schadstoffbelastung
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2018)
- B-Plan: Stadt München
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

Anhang F

Ergebnisse der energetischen Einsparpotenziale für das Untersuchungsgebiet „Hustadt“





Legend

IWU-Methode Hustadt

IWU_Methode_Energie

EinspPE_M2

- ≤69,7
- ≤109,4
- ≤143,0
- ≤159,0
- ≤169,0
- ≤174,0
- ≤191,0
- ≤216,0
- ≤241,0

Untersuchungsgebiet Hustadt

Bochum, Deutschland

Einsparpotenzial Primärenergie [kwh/m² BGF a]
Differenz aus "IST-Zustand" und
Modernisierungspaket "zukunftsweisend"

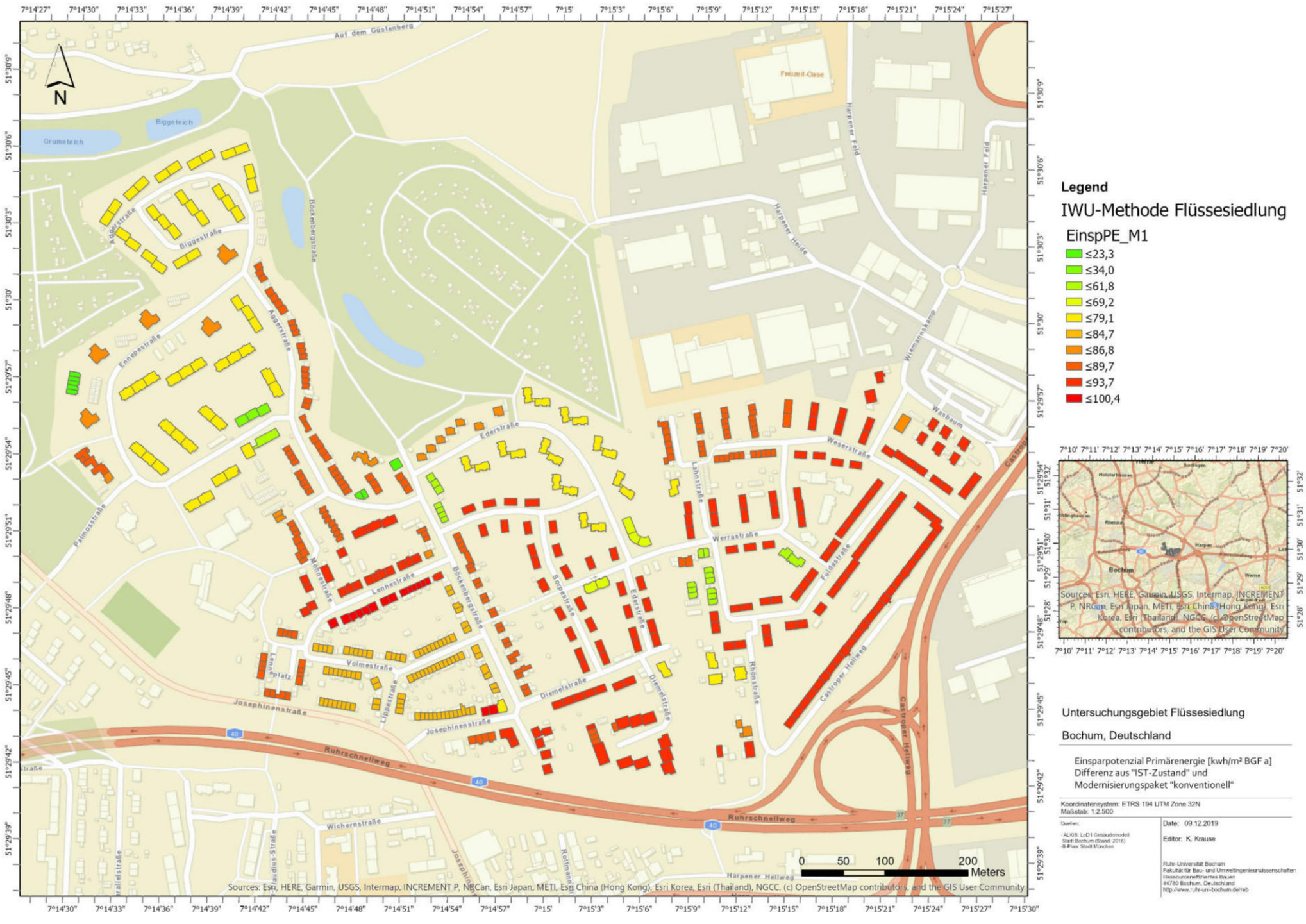
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
- 3-Plan Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

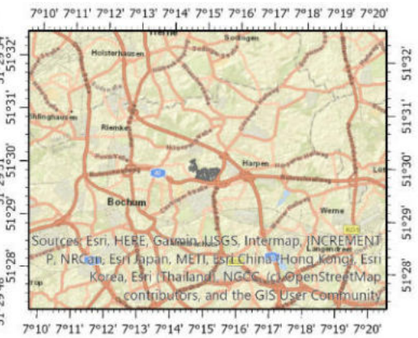

Legend
IWU-Methode Flüssesiedlung
EinspPE_M1
≤23,3
≤34,0
≤61,8
≤69,2
≤79,1
≤84,7
≤86,8
≤89,7
≤93,7
≤100,4
Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung
Bochum, Deutschland
Einsparpotenzial Primärenergie [kwh/m² BGF a]
Differenz aus "IST-Zustand" und
Modernisierungspaket "konventionell"
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500
Date: 09.12.2019
Editor: K. Krause
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb
0 50 100 200 Meters
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community
N
Auf dem Güstenberg
Biggeteich
Grumeteich
Freizeit-Oase
Harpener Feld
Harpener Heide
Wiemannskamp
Wasbaum
Weserstraße
Ederstraße
Lahnstraße
Werrastraße
Fuldastraße
Castroper Hellweg
Rhönstraße
Diemelstraße
Sorpestraße
Böckenbergstraße
Lennestraße
Mohnestraße
Volmestraße
Lippestraße
Josephinenstraße
Ruhrschnellweg
Wichernstraße
Ennepestraße
Biggestraße
Aggerstraße
Patmosstraße
Lenneplatz
Rottmannstraße
Josephinstraße
Claudius-Straße
Harpener Hellweg
Castroper Hellweg
Bochum
Sources: Esri, HERE, Garmin, USGS, Intermap, INCREMENT P, NRCan, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), Esri Korea, Esri (Thailand), NGCC, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Legend

IWU-Methode Flüssesiedlung

EinspPE_M2

- ≤54,6
- ≤75,5
- ≤117,7
- ≤123,6
- ≤127,7
- ≤137,8
- ≤144,3
- ≤151,5
- ≤156,9
- ≤166,2



Untersuchungsgebiet Flüssesiedlung

Bochum, Deutschland

Einsparpotenzial Primärenergie [kwh/m² BGF a]
Differenz aus "IST-Zustand" und
Modernisierungspaket "Zukunftsweisend"

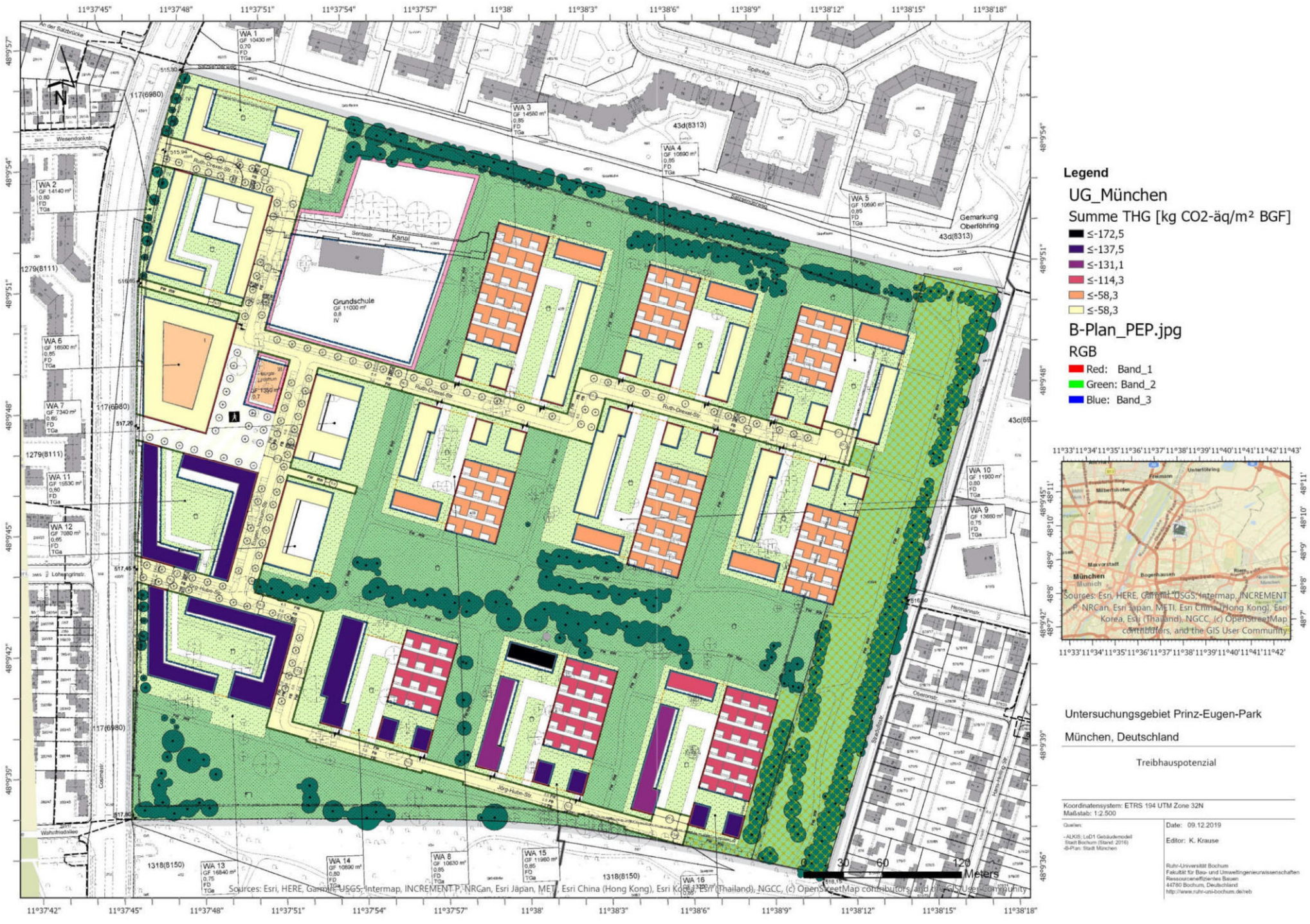
Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell
Stadt Bochum (Stand: 2018)
-B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb



Untersuchungsgebiet Prinz-Eugen-Park

München, Deutschland

Treibhauspotenzial

Koordinatensystem: ETRS 194 UTM Zone 32N
Maßstab: 1:2.500

Quellen:
- ALKIS: LoD1 Gebäudemodell Stadt Bochum (Stand: 2016)
- B-Plan: Stadt München

Date: 09.12.2019

Editor: K. Krause

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
44780 Bochum, Deutschland
http://www.ruhr-uni-bochum.de/reb

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Karina Krause
E-Mail	Karina.Krause@rub.de
Geburtsdatum	6. März 1984
Geburtsort	Recklinghausen

Beruflicher Werdegang

Seit Februar 2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Ruhr-Universitär Bochum AG Ressourceneffizientes Bauen, Bochum
Oktober 2011 – Oktober 2013	Projektingenieur für Lärmschutz und Luftreinhaltung Peutz Consult GmbH, Dortmund

Hochschulausbildung

Oktober 2003 – März 2011	Studium: Umwelttechnik & Ressourcenmanagement (UTRM) an der Ruhr-Universität Bochum Abschluss: Diplom-Ingenieur

Schulausbildung

August 1994 – Juni 2003	Käthe – Kollwitz – Schule Städtische Gesamtschule, Recklinghausen Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Publikationen

- Ebert, S.; Ott, S.; Krause, K.; Hafner, A.; Krechel, M.: Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene. Bautechnik. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. April 2020. Berlin
- Krause, K., Hafner, A.: Relevance of the information content in module D on circular economy of building material. Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision – Caspeele, Taerwe & Frangopol (Eds), 2019 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-62633-1
- Oezdemir, O.; Krause, K.; Hafner, A. Creating a Resource Cadaster—A Case Study of a District in the Rhine-Ruhr Metropolitan Area. Buildings 2017, 7(2), 45; DOI:10.3390/buildings7020045
- Hafner, A., Schäfer, S., Krause, K.: Environmental footprint of timber buildings and the implementation in city planning. WCTE 2016, Conference Proceedings; ISBN: 978-3-903039-00-1; Wien. Österreich; 2016.
- Krause, K.; Hafner, A.: GIS based resource identification and resource cadastres for existing buildings. First International Conference on Mining in Europe. Aachen International Mining Symposia (AIMS 2016). Aachen, 2016.
- Krause, K.; Hafner, A., Schäfer, S.: Resources in buildings and their recycling options. Conference Proceedings Sustainable Built Environment Conference 2016 Zürich, DOI 10.3218/3774-6_73, vdf Zürich, 2016.
- Hafner, A., Schäfer, S., Krause, K.: Effects of different reference study periods of timber and mineral buildings on material input and global warming potential. Conference Proceedings Sustainable Built Environment Conference 2016 Hamburg, DOI: 10.5445/IR/1000051699, ISBN: 978-3-00-052213-0, pp438-447, Hamburg, 2016.
- Hafner, A., Schäfer, S., Krause, K.: The linkage of environmental requirements with the selling of building plots – an example. Conference Proceedings Sustainable Built Environment Conference 2016 Hamburg, DOI: 10.5445/IR/1000051699, ISBN: 978-3-00-052213-0, pp1266-1275, Hamburg, 2016.
- Hafner, A., Schäfer, S., Krause, K.: Environmental footprint of timber buildings and the implementation in city planning. WCTE 2016, Conference Proceedings, Wien. Österreich 2016.