

TU Berlin → Daria Dzhurko | Ben Haacke | Asta Haberbosch | Linde Köhne | Nora König | Frida Lode | Antonia Marx | Luka Mühlhnickel | Nina Neunzig | Annika Niemann | Henrieke Polewka | Lea Schmidtke | Pia Luz von der Groeben | Karl Wagemann | Clemens Bothe | Galina Churkina | Tegel Projekt GmbH → Gudrun Sack | Farah Thoma | Simon Wimmer

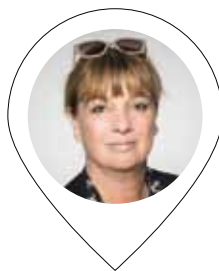
2024

WÄLDER, STÄDTE UND IHR KOHLENSTOFFKREISLAUF – QUANTIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNGEN VERSCHIEDENER ARTEN DER BAUKONSTRUKTION AUF DEN KOHLENSTOFFHAUSHALT IM SCHUMACHER QUARTIER, BERLIN

WÄLDER, STÄDTE UND IHR KOHLEN- STOFFKREISLAUF – QUANTIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNGEN VERSCHIEDENER ARTEN DER BAUKONSTRUKTION AUF DEN KOHLEN- STOFFHAUSHALT IM SCHUMACHER QUARTIER, BERLIN

| | |
|---|----|
| VORWORT | 01 |
| ABSTRACT | 03 |
| 1 EINLEITUNG | 05 |
| 1.1 Klimawandel und der globale Kohlenstoffzyklus | 05 |
| 1.2 Baustoffe und ihre Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffzyklus | 05 |
| 1.3 Forstwirtschaft | 06 |
| 1.4 Beschreibung der Baupläne für das Schumacher Quartier | 06 |
| 1.5 Ziel und Aufbau | 08 |
| 2 DATEN UND METHODEN | 09 |
| 2 Grundlage und Herkunft der Daten | 10 |
| 2.1 Gebäudeauswahl | 11 |
| 2.1.1 Mineralbasierte Arten der Baukonstruktion | 15 |
| 2.1.2 Holzrahmen-Leichtbauweisen | 19 |
| 2.1.3 Massivholzbauweisen | 23 |
| 2.2 Potenzielle Baustofflieferantinnen und Baustofflieferanten | 27 |
| 2.3 Beschreibung des numerischen Algorithmus | 28 |
| 2.4 Eingangsdaten für Berechnungen | 28 |
| 2.5 Holznachfrage | 29 |
| 2.6 Meinungen von Expertinnen und Experten | 30 |
| 3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION | 31 |
| 3.1 Welche Arten der Baukonstruktion sind am klimafreundlichsten? | 32 |
| 3.2 Welche Baustoffe und Gebäudeteile leisten den größten Beitrag bei ... | 34 |
| ... Mineralbasierten Bauweisen? | 34 |
| ... Holzrahmen-Leichtbauweisen? | 35 |
| ... Massivholzbauweisen? | 37 |
| 3.2.1 Zusammenfassende Anmerkungen | 38 |
| 3.3 Ist der Einsatz von regionalem Holz und anderen regionalen Rohstoffen am klimafreundlichsten? | 39 |
| 3.4 Berechnung der benötigten Holzmengen | 42 |
| 3.5 Unsicherheiten und Einschränkungen | 43 |
| 3.5.1 Eingangsdaten | 43 |
| 3.5.2 Transportemissionen | 43 |
| 3.5.3 Weitere Unsicherheiten | 44 |
| 4 FAZIT | 47 |
| 4.1 Empfehlungen | 47 |
| 4.2 Ausblick | 47 |
| 4.3 Zukünftige Forschungsfragen | 47 |
| 5 FINANZIERUNG | 48 |
| 6 DANKSAGUNGEN | 48 |
| 7 BEITRÄGE DER AUTORINNEN UND AUTOREN | 48 |
| 8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 49 |
| 9 TABELLENVERZEICHNIS | 51 |
| 10 REFERENZEN | 51 |
| IMPRESSUM | 55 |

WIE BAUE ICH AM NACH- HAL- TIGS- TEN MIT HOLZ?



GUDRUN SACK

*Geschäftsführerin
der Tegel Projekt GmbH*

Weltweit stehen Städte vor der Herausforderung, die wachsende Nachfrage an Wohnraum ökologisch verträglich zu befriedigen. Ressourcenschonendes Bauen spielt deshalb eine große Rolle bei der Errichtung des Schumacher Quartiers. Hier sollen in den kommenden 15 Jahren auf 46 Hektar Fläche über 5.000 Wohnungen entstehen, die mehr als 10.000 Menschen komfortables, bezahlbares und nachhaltiges Wohnen versprechen.

In dem Modellquartier werden neue Konzepte und Anwendungen zum Einsatz kommen. Es wird eine Smart City und Schwammstadt mit einer konsequent ressourcen- und klimafreundlichen Infrastruktur, hoher Biodiversität und autofreier Mobilität. Und: Es ist als eines der größten urbanen Holzbauprojekte Europas geplant. Lösungen, die zu seiner erfolgreichen Realisierung beitragen, sollen Vorbild sein für viele andere nachhaltige Quartiere in Berlin und überall auf der Welt.

HOLZ ALS GAMECHANGER

Der Gebäudesektor hat einen maßgeblichen Anteil an den CO₂-Emissionen weltweit – und das Bauen mit Holz das Potenzial eines echten Game Changers auf dem Weg in Richtung Klimaneutralität. Das Baumaterial bietet neben seiner Eigenschaft als wichtiger CO₂-Speicher weitere Vorteile: Es eignet sich sehr gut für eine einfache Bauweise mit losen Elementen und Modulen, kann präzise vorgefertigt und auf der Baustelle schnell montiert werden. Der Einsatz von computergesteuerten Planungsmethoden und Robotik erlaubt es, in der Planung und in der Produktion neue Wege zu gehen. Die Gesamtbauproduktionszeit lässt sich dadurch deutlich verkürzen.

HOLZ AUS DER REGION

In der Region Berlin-Brandenburg haben wir so viel Kiefernholz, um in den nächsten 15 Jahren in ganz Berlin mit Holz bauen zu können. Wenn wir die vorhandenen Monokulturwälder nachhaltig bewirtschaften und in widerstandsfähige Mischkulturen umwandeln, ist das ein Vorteil für die gesamte Region. In den Bauprozessen werden wir darüber hinaus unabhängig vom internationalen Holzmarkt, und Abläufe wären auch besser planbar.

FORSCHUNG MIT DIREKTEM ANWENDUNGSBEZUG

In dem einjährigen Forschungsvorhaben mit Studierenden der Technischen Universität Berlin unter der Leitung von Professorin Galina Churkina wurden die Wertschöpfungsketten im Holzbau systematisch, empirisch und qualitativ untersucht.

Anspruch war von Beginn an, wertvolle Erkenntnisse für das Schumacher Quartier zu gewinnen, Wissenstransfer für den Planungsalltag des Holzbaus zu leisten und konkret anwendbare Kriterien für diesen zu entwickeln. Die Studie untersucht die Rolle von Baumaterialien, insbesondere von Holz, im Kontext des Klimawandels und des globalen Kohlenstoffkreislaufs.

SUCHE NACH DER BESTEN CO₂-BILANZ

Vor dem Hintergrund der akademischen Diskussion, ob massiver Holzbau, doch eher der Holzrahmenbau oder sogar eine Holzleichtbaukonstruktion die nachhaltigste Konstruktionsweise sei, entstand im Austausch zwischen Professorin Churkina und mir die Idee zu dieser Studie.

Es folgte eine detaillierte Erarbeitung und Diskussion durch Studierende der TU Berlin und Mitarbeitende der Tegel Projekt GmbH anhand eines beispielhaften Riegeltypus, eines viergeschossigen Wohngebäudes, im Schumacher Quartier. Die Tegel Projekt GmbH hat verschiedene Aufbauten für Geschossdecken und Wände vorgegeben, die von der Studiengruppe in allen Details in Bezug auf ihre CO₂-Bilanz berechnet wurden.

Ziel war es, die klimafreundlichste Konstruktionsweise zu ermitteln, indem holz- und mineralbasierte Bauweisen verglichen und deren Beitrag zu Kohlenstoffemissionen und Kohlenstoffspeicherkapazitäten bewertet wurden. Darüber wurde jedes Baumaterial anhand seines Beitrags zum Kohlenstoffausstoß bei Produktion, Herstellung und Transport sowie der Fähigkeit CO₂ zu speichern, analysiert. Für uns absolut spannend war zudem die Frage, ob eine regionale Verwendung von Holz zu einem klimafreundlicheren Gebäude führt.

PARAMETER FÜR NACHHALTIGEN HOLZBAU

Das Ergebnis ist komplex, aber für jeden regionalen Kontext anwendbar. Es gibt sie nicht, die eine Antwort auf die tiefergehenden Frage „Wie baue ich am nachhaltigsten mit Holz?“. Es braucht weiterhin den differenzierten Blick auf das konkrete Projekt, die Region, die dortigen Liefer- und Wertschöpfungsketten. Diese Arbeit gibt aber Hinweise darauf, auf welche Parameter zu achten ist, um Holzbau in der jeweiligen Region sinnvoll nachhaltig umzusetzen.



GALINA CHURKINA

*Professorin für Stadtökologie,
Technische Universität Berlin*

Seit Jahrzehnten erforschen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen die Kapazitäten von Wäldern, Böden und Ozeanen als Kohlenstoffsenken, um die enorme Freisetzung von CO₂ durch die Verbrennung fossiler Energieträger auszugleichen. In diesen Studien kamen Bedenken hinsichtlich der dauerhaften Nutzungsfähigkeit derartiger Kohlenstoffsenken auf, weil der Klimawandel diese Ökosysteme bereits erheblich stört. In letzter Zeit kam die Schaffung von menschengemachten Kohlenstoffsenken als mögliche Ergänzung zur natürlichen Kohlenstoffaufnahme und -lagerung ins Gespräch.

Das in den nächsten Jahrzehnten erwartete Wachstum und die Urbanisierung der Weltbevölkerung werden eine enorme Nachfrage nach Gebäuden und Infrastruktur schaffen. Würden diese statt aus Stahl und Beton mit Materialien entwickelt, die auf Biomasse basieren, könnten sie zu solchen menschengemachten Kohlenstoffsenken werden. Stahl und Stahlbeton als konventionelle Baumaterialien verursachen bei der Produktion hohe CO₂-Emissionen und verfügen nur über eine geringe oder gar keine Kapazität zur Speicherung von Kohlenstoff. Ihre ureigensten Vorteile, Festigkeit und Steifigkeit, gehen erheblich auf Kosten der Umwelt. Neu aufkommende Materialtechnologien und Baugruppen aus Holz verbinden eine beachtliche strukturelle Leistungsfähigkeit mit einer hohen Fähigkeit zur Kohlenstoffspeicherung und geringen Emissionen bei der Produktion. Doch welche Technologie ist zu wählen, wenn wir sowohl die CO₂-Speicherung als auch die Emissionen optimieren wollen? Welche Rolle spielt der Materialtransport in dieser Gleichung?

Die Pläne, das Schumacher Quartier in Berlin mit lokalem Holz zu planen, wirken wie eine perfekte Fallstudie zur Untersuchung dieser Fragen. Anfang des Jahres 2022 trafen wir uns mit Gudrun Sack und diskutierten die bestmögliche Holzbaubauweise für dieses Vorhaben – in Bezug auf eine maximale CO₂-Speicherung und minimale Emissionen während der Bauproduktion. Gemeinsam mit meinen Studierenden an der TU Berlin wurden die erforderlichen Daten erhoben und kurz danach die Pilotstudie durchgeführt. Die ersten Ergebnisse sahen vielversprechend aus, sodass wir entschieden, diesen mit tiefergehenden Untersuchungen nachzugehen. Das Team in Tegel entwickelte genauere und vollständige Beschreibungen der sechs möglichen Baugruppen für das Schumacher Quartier. Gemeinsam mit einer weiteren Studiengruppe der TU erstellten wir nachfolgend eine umfassende Betrachtung des Kohlenstoffs dieser Baugruppen, die in diesem Bericht beschrieben ist. Diese Betrachtung basiert auf der Pilotstudie und einer eingehenden Analyse der einschlägigen Literatur, umfangreichen Datenrecherchen, einem numerischen Modell und Interviews mit Expertinnen und Experten im Rahmen unserer Exkursion.

ABSTRACT

Diese Studie untersucht die Rolle von Baustoffen, insbesondere Holz, im Kontext des Klimawandels und des globalen Kohlenstoffzyklus. Das Ziel ist es, die klimafreundlichste Art der Baukonstruktion zu ermitteln, indem holz- und mineralbasierte Bauweisen verglichen werden und ihr Beitrag zu Kohlenstoffemissionen sowie ihr Potenzial, Kohlenstoff zu binden, bewertet werden. Darüber hinaus wird jeder Baustoff und jeder Gebäudeteil im Hinblick auf seinen Beitrag zu den Kohlenstoffemissionen bei Produktion, Fertigung und Transport sowie im Hinblick auf sein Potenzial zur Kohlenstoffbindung bewertet. Außerdem beurteilt die Studie, ob der regionale Gebrauch von Holz zu einem klimafreundlicheren Gebäude führt.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Allgemeinen holzbasierte Arten der Baukonstruktion in der Produktion rund 40 % weniger Kohlenstoffemissionen erzeugen als mineralbasierte Arten der Baukonstruktion. Mineralische Baustoffe wie Kalkstein, Stahlbeton und Ziegel haben das geringste Potenzial zur Kohlenstoffbindung. Im Gegensatz dazu weisen holzbasierte Bauweisen aufgrund der höheren Mengen an organischen Materialien ein höheres Kohlenstoffbindungspotenzial auf. Die Kohlenstoffbindung in biomasse-basierten Gebäuden reicht von 21,5 kt bis zu 70,3 kt und ist daher 4- bis 19-mal so groß wie bei mineralbasierten Arten der Baukonstruktion. Außerdem spielen Transportwege eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Kohlenstoffemissionen, wobei die Transportemissionen in hohem Maße von dem transportierten Gewicht abhängen. Der Transport von leichteren Materialien hat geringere Auswirkungen als der Transport von schwereren Materialien. Die höchsten Transportemissionen in Höhe von 14,6 kt werden von der Thoma-Holzbauweise erzeugt, während die geringsten Transportemissionen (1,9 kt) von der Holzrahmenbauweise verursacht werden. Darüber hinaus kann die Wahl des Transportmittels erhebliche Auswirkungen haben, da der Schienentransport die Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen LKW (3,5–7,5 t) um 96 % reduzieren kann. Die Ergebnisse zeigen die Vorteile der Verwendung von organischen Baustoffen bezüglich ihrer geringeren Kohlenstoffemissionen und ihres höheren Kohlenstoffbindungspotenzials. Diese Ergebnisse haben Implikationen für nachhaltige Baupraktiken und weisen darauf hin, dass holzbasierte Bauweisen eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks im Bauwesen bieten.

Diese Studie trägt zu einem Verständnis nachhaltiger Baupraktiken und ihres Potenzials zur Bekämpfung des Klimawandels bei. Zukünftige Studien könnten sich eingehender mit der Umsetzung nachhaltiger Praktiken in der Forstwirtschaft beschäftigen und die gesetzlichen Rahmenbedingungen untersuchen, die benötigt werden, um den Einsatz von Holz als klimafreundlichem Baustoff zu fördern.

1 EINLEITUNG



1.1 KLIMAWANDEL UND DER GLOBALE KOHLENSTOFF-ZYKLUS

Der Klimawandel wurde als eine der größten Bedrohungen für die Menschheit und alle Lebewesen auf dem Planeten identifiziert (IPCC, 2023). Die Hauptursache für den Klimawandel auf der Erde ist die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre (ebd.). Da die Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan chemisch unter anderem auf Kohlenstoff basieren, ist der Kohlenstoffzyklus besonders relevant, wenn es darum geht, den Klimawandel zu verstehen und zu bekämpfen.

Der globale Kohlenstoffzyklus stellt ein sehr komplexes System dar, das Kohlenstoffbestände und -flüsse auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen innerhalb und zwischen Teilen der Atmosphäre, der Biosphäre und der Lithosphäre umfasst (Carlson et al., 2008; Reichle, 2023). Die größten Kohlenstoffbestände sind in Gestein gebunden, gefolgt von den Meeren, den Böden, der Atmosphäre und der lebenden Pflanzenbiomasse (Carlson et al., 2008). Anthropogene Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe, großangelegte Veränderungen der Flächennutzung (Urbanisierung, intensive Landwirtschaft und Abholzung) sowie ressourcenintensive Konsummuster führen zur Freisetzung von gebundenem Kohlenstoff und erhöhen damit die Treibhausgasemissionen, vor allem von CO₂ (IPCC, 2023). Menschen sind für tiefgreifende Veränderungen des Kohlenstoffzyklus verantwortlich, indem sie natürliche Kohlenstoffbestände und -flüsse aus ihrem Gleichgewicht bringen (Carlson et al., 2008; IPCC, 2023).

Wenn die Emissionen von Treibhausgasen nicht minimiert werden, intensivieren sich die Auswirkungen auf den Klimawandel (IPCC, 2023). Um Emissionen effektiv langfristig zu reduzieren, müssen die Sektoren mit den höchsten CO₂-Emissionen berücksichtigt werden. Daher könnte das Bauwesen einen vielversprechenden und wichtigen Ausgangspunkt bilden. Im Jahr 2021 beliefen sich die CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Bau, dem Betrieb und der Verwaltung von Gebäuden auf 37 % der globalen CO₂-Emissionen. 9 % dieser Emissionen stammen allein aus der Produktion mineralischer Baustoffe wie Stahl, Ziegeln oder Beton (Umweltprogramm der Vereinten Nationen, 2022).

1.2 BAUSTOFFE UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF DEN GLOBALEN KOHLENSTOFFZYKLUS

Seit der Industriellen Revolution haben sich mineralische Baustoffe aufgrund ihrer beeindruckend hohen Zugfestigkeit und Stabilität zum Standard für das moderne Bauwesen in großem Maßstab entwickelt. Diese Baustoffe haben jedoch entscheidende Nachteile: Ihre Produktion und Verarbeitung benötigen viel Energie, die zum Großteil aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen stammt (Dangel, 2017). Diese Probleme zeigen, wie dringend es ist, dass weltweite Baupraktiken transformiert und neue Wege für nachhaltiges Bauen geschaffen werden. Die Wahl der Baustoffe und die Energieleistung von Gebäuden bieten daher ein enormes Potenzial zur Emissionssenkung (Churkina et al., 2020; IEA, 2022).

Als erneuerbare Ressource ist Holz ein vielversprechendes Material für diesen Zweck (Dangel, 2017). Bäume binden Kohlenstoff während ihres gesamten Lebenszyklus und spielen daher eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffzyklus, indem sie als natürliche Kohlenstoffsinken fungieren. Der gebundene Kohlenstoff bleibt selbst dann in dem Material, wenn ein Baum gefällt wird. Die Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre tritt erst durch die aerobe Zersetzung oder durch die Verbrennung von Holz ein. Üblicherweise geschieht dies erst nach jahrzehntelanger Nutzung der Holzzeugnisse (Organschi et al., 2016). Die Bindung von Kohlenstoff in langlebigen Holzzeugnissen wie Gebäudeteilen kann daher den urbanen Kohlenstoffbestand potenziell vergrößern (Lauk et al., 2012). Die Lebensdauer von Holzbaustoffen beträgt Schätzungen zufolge mindestens 50 Jahre, kann aber durch eine Kaskadennutzung von Holz noch darüber hinaus verlängert werden (Höglmeier et al., 2015; Neuhaus, 2017). Neben ihrem Kohlenstoffbindungspotenzial können Holzgebäude und langlebige Holzzeugnisse durch zwei Arten von Substitutionseffekte positive Auswirkungen auf den Kohlenstoffzyklus haben. Erstens würde der vermehrte Einsatz von holzbasierten Baustoffen anstelle mineralischer Baustoffe beim Bau von Gebäuden zur Vermeidung von Kohlenstoffemissionen bei der Produktion von mineralischen Materialien wie Beton oder Stahl führen (Bowyer et al., 2012).

Zweitens kann eine erhöhte Nachfrage nach Holz die Forstwirtschaft fördern und daher in einigen waldreichen Regionen der Erde verhindern, dass Wälder aus wirtschaftlichen Gründen abgeholzt werden, zum Beispiel zur

Gewinnung landwirtschaftlicher Flächen (Bowyer et al., 2012; Dangel, 2017).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Produktion von mineralischen Baustoffen große Mengen an Kohlenstoff in die Atmosphäre freisetzt, wohingegen holzbasierte Baustoffe Kohlenstoff langfristig binden können und beim Einsatz im Bauwesen als natürliche Kohlenstoffsinken fungieren. Neben anderen Vorteilen von Holzbauweisen (kurze Bauzeiten, hoher Grad an Vorfertigung, geringes Gewicht und angenehmes Raumklima) ist dies einer der Gründe, warum der Bau mit biomassebasierten bzw. emissionsarmen Baustoffen zunehmend Beachtung als Maßnahme zur Bekämpfung des Klimawandels findet (Churkina et al., 2020; Hildebrandt et al., 2017).

1.3 FORSTWIRTSCHAFT

Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit, den Fokus auf regionale Forstwirtschaft zu legen, um eine nachhaltige Rohstoffversorgung für den Holzbau zu gewährleisten. Weltweit und in allen Waldbiomen macht in Bäumen gebundener Kohlenstoff (überirdische Biomasse und Wurzelsysteme) 42 % des Kohlenstoffbestands aus, der Boden 44 % und abgestorbenes Holz und heruntergefallene Blätter 13–14 % in Wäldern in gemäßigten Klimazonen (Pan et al., 2011). Die Aufrechterhaltung der Widerstandsfähigkeit dieser Ökosysteme ist daher wichtig, um ihre wertvolle Funktion als Kohlenstoffsinken zu wahren.

Zunehmende extreme Wetterereignisse wie Hitze, Dürre und heftiger Niederschlag machen Wälder anfälliger für natürliche Bedrohungen wie Waldbrände, Stürme und Insektenbefall (Arnold, A. I. M et al., 2016; Martínez-Sancho et al., 2022; Palviainen et al., 2020). Diese Ereignisse können die Fähigkeit von Wäldern reduzieren, Kohlenstoff kurzfristig zu absorbieren und zu binden, und die Kohlenstoffemissionen in die Atmosphäre erhöhen. Daher ist eine aktive Forstbewirtschaftung nötig, um sicherzustellen, dass diese Ökosysteme den Klimawandel bewältigen und ihre Funktion als natürliche Kohlenstoffsinken aufrechterhalten können.

Eine Methode, dies zu erreichen, ist die Beeinflussung der Zusammensetzung der Wälder in Bezug auf die Baumarten. Osuri et al. (2020) kamen zu dem Ergebnis, dass seminatürliche und biodiverse Wälder weniger anfällig für Störungen wie Dürre sind als monodominante Kulturen. Außerdem ist das Kohlenstoffbindungspotenzial von Laub- und Mischwäldern insgesamt höher als das von Nadelwäldern (Chen et al., 2016; He et al., 2013). Zudem wirken sich bestimmte Bewirtschaftungs- und Erntemethoden auf die natürliche Kohlenstoffbindung aus.

„Kahlschlag“ ist eine Vorgehensweise, bei der alle Bäume entnommen werden – der Wald wird von einer Senke zu einer Kohlenstoffquelle. Infolge eines Kahlschlags sinkt die Nettoprimärproduktion auf null. Die Kohlenstoffbestände im Boden vergrößern sich in den ersten beiden Jahren nach der Abholzung, beginnen in darauffolgenden Jahren jedoch mit zunehmender mikrobieller Aktivität zu sinken (Ameray et al., 2021).

„Teilschläge“ sind eine andere Praktik, bei der nicht alle Bäume auf einmal geschlagen werden. Für diese Bewirtschaftungsmethode ist keine bestimmte Anzahl an geschlagenen Bäumen vorgegeben. Die Auswirkungen auf die Kohlenstoffbindung und den Kohlenstoffbestand im Boden schwankt daher und hängt beispielsweise von der Intensität der Abholzung und der Dauer der Waldregeneration ab. Die Forstbewirtschaftung mit der „Teilschlag“-Methode kann die Kohlenstoffbindung im Wald potenziell erhöhen und sich positiv auf die Kohlenstoffbestände im Boden auswirken (Ameray et al., 2021). Die Kohlenstoffbestände können ebenfalls teilweise erhalten werden, indem nicht der ganze Baum abgeerntet wird, sondern die Äste, die Baumkrone oder die Rinde vor Ort zurückgelassen werden (Johnson & Curtis, 2001).

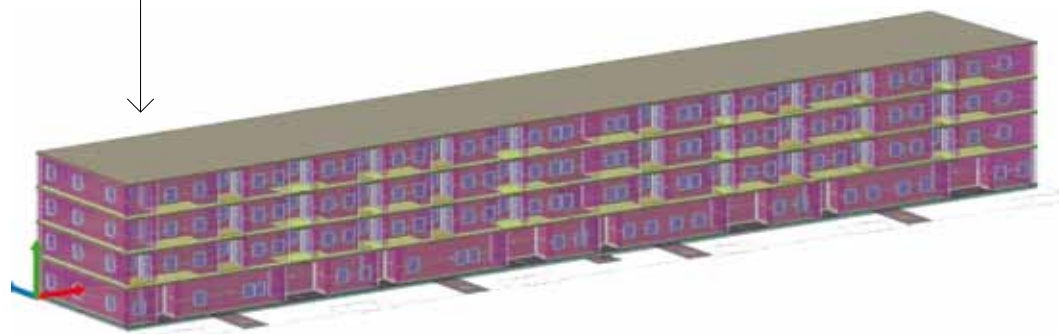
Die angemessene Holzernterate und das Ausmaß der Kohlenstoffbindung sind je nach Waldökosystem und Klimazone unterschiedlich (Ameray et al., 2021). Außerdem sind sie von bestimmten biotischen und abiotischen Faktoren abhängig (ebd.).

1.4 BESCHREIBUNG DER BAUPLÄNE FÜR DAS SCHUMACHER QUARTIER

Die vorliegende Studie vergleicht sechs verschiedene Arten der Baukonstruktion, von denen vier vorwiegend holzbasiert sind, am spezifischen Beispiel des Schumacher Quartiers in Berlin, Deutschland. Das Schumacher Quartier ist Teil des Stadtplanungsprojekts Berlin TXL, das dem ehemaligen Flughafen Berlin Tegel eine neue Nutzung verleihen soll. Es befindet sich im östlichen Teil des Standorts des ehemaligen Flughafens Berlin Tegel mit den Koordinaten N 52°32'59.8" und E 13°17'52.3". Das gesamte ehemalige Flughafengelände hat eine Größe von etwa 500 ha, wovon das Schumacher Quartier 48 ha ausmacht. Es ist somit eines der größten Stadtentwicklungsprojekte in Europa (Ambrosius-Groß et al., 2023).



→ **Abbildung 1**
Plan des Schumacher Quartiers, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023. Der schwarze Pfeil weist auf das in Abbildung 2 dargestellte vierstöckige Beispielgebäude hin.



→ **Abbildung 2**
Beispiel eines vierstöckigen Gebäudes, das für das Schumacher Quartier geplant ist, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

Die Pläne für das Schumacher Quartier umfassen ökologische und nachhaltige Baukonzepte für 5.000 Wohnungen für über 10.000 Bewohnerinnen und Bewohner (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Die Hälfte wird von landeseigenen Wohnungsbau-gesellschaften gebaut. Die vorgeschlagene Baustrategie schließt die Verwendung von Holz als Primärbaustoff für Gebäude ein, um Kohlenstoffemissionen in der gesamten Bauphase zu vermindern und Kohlenstoff in den Gebäuden zu binden. Zusammenfassend gesagt verfolgen die Projektentwickler das Ziel, den mit dem Schumacher Quartier verbundenen CO₂-Fußabdruck möglichst gering zu halten. Die Pläne für das Schumacher Quartier umfassen sowohl begrünte Dächer als auch Grünflächen zwischen den Gebäuden.

Die Einbeziehung von Grünflächen in die gebaute Umgebung trägt zur Verbesserung der ökologischen Integration bei und bietet Lebensraum für lokale Artenvielfalt (persönliches Gespräch mit der Tegel Projekt GmbH, 2023).

1.5 ZIEL UND AUFBAU

Zahlreiche Studien haben die Vorteile der Verwendung von holzbasierten Baustoffen im Bauwesen belegt, wenn es darum geht, Kohlenstoffemissionen zu senken, ohne die natürliche Funktion von Wäldern als Kohlenstoffsenke zu beeinträchtigen (Arehart et al., 2021; Churkina et al., 2020; Hart & Pomponi, 2020; Hildebrandt et al., 2017). Die Expansion des Holzbaus steht in Deutschland jedoch immer noch vor diversen Hindernissen. Branchenexpertinnen und Branchenexperten und der Gesetzgeber sind der Ansicht, dass mehr Wissen über holzbasierte Baustoffe benötigt wird, die Ausbildung im Bauwesen ihren Schwerpunkt stärker auf nachhaltiges Bauen verlagern sollte und dass gesetzliche Vorgaben, zum Beispiel zum Brandschutz oder zur Freisetzung flüchtiger organischer Verbindungen in Innenräumen, überprüft werden müssen (Handreichung Holzbauintiative, 2023; Europäische Umweltagentur, 2014). Es werden praktische, wissenschaftlich fundierte Richtlinien benötigt, um den Einsatz von Holz im Bauwesen zu fördern und Architektinnen und Architekten sowie Stadtplanerinnen und Stadtplaner langfristig zu unterstützen.

Der vorliegende Bericht analysiert sechs Arten der Baukonstruktion, die für das Schumacher Quartier in Erwägung gezogen werden, und beschäftigt sich mit den folgenden Fragen:

- 1. Welche Arten der Baukonstruktion sind am klimafreundlichsten im Hinblick auf ihre Kohlenstoffemissionen und die Kohlenstoffbindung?
- 2. Welche Baustoffe und Gebäudeteile leisten den größten Beitrag zu den Kohlenstoffemissionen bei Produktion, Fertigung und Transport und welche Baustoffe binden den meisten Kohlenstoff?
- 3. Ist der Einsatz von regionalem Holz und anderen regionalen Rohstoffen immer am klimafreundlichsten?

Der erste Teil dieses Berichts stellt die verschiedenen Arten der Baukonstruktion, die für die Berechnungen zur Kohlenstoffbilanz (CCA) verwendete Methode und die relevanten Daten vor. Im zweiten Teil werden die Ergebnisse der Bewertung des Kohlenstoffzyklus vorgestellt und die damit verbundenen Unsicherheiten diskutiert. Der Bericht endet mit Schlussfolgerungen zu den Leitfragen und einem Ausblick auf die zukünftige Forschung.

2

DATEN UND METHODEN

GRUNDLAGE UND HERKUNFT DER DATEN

Die Datengrundlage für diese Studie wurde in Zusammenarbeit mit der Tegel Projekt GmbH bereitgestellt. Die Tegel Projekt GmbH war verantwortlich für die Konzipierung der sechs Arten der Baukonstruktion, die als Grundlage für die folgenden Untersuchungen gedient haben. Sie hat die Architektur der Gebäude entwickelt und die Baustoffe mit ihren Mengen, Dichten und Massenverhältnissen ermittelt, auf denen die Berechnungen basieren.

Das Anwendungsbeispiel bezieht sich auf einen vierstöckigen Gebäudeblock mit einer Fläche von 1.276,429 m² pro Stockwerk und einer Außenwandfläche von 1.935,402 m² (Fenster ausgenommen), wobei die Fenster schätzungsweise 30 % der gesamten Außenfläche ausmachen. Innenwände wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Deckenfläche beläuft sich auf 3.824,32 m², während die Dachfläche 1.274,77 m² ausmacht. Das Dach soll vollständig mit Vegetation bedeckt werden.

Die sechs Arten der Baukonstruktion, bei der jeweils die Außenwände, die Rohdecken und das Dach in der Analyse berücksichtigt werden, lassen sich in drei Kategorien einteilen: mineralbasierte Bauweise, Holzrahmen-Leichtbauweisen und Massivholzbauweisen. Eine Tabelle mit allen Baustoffen, die bei den sechs Arten der Baukonstruktion verwendet werden, sowie ihren Anteilen am Gewicht des Gesamtgebäudes und einzelner Gebäudeteile (Wände, Rohdecken, Dach) ist im Anhang zu finden (Tabelle 2).

2.1 GEBÄUDEAUSWAHL

Für die Betrachtung dieser Studie wurde ein exemplarisches Gebäude aus dem Bebauungsplan des Schumacher Quartiers gewählt, das sich im ersten Bauabschnitt befindet und eine Kubatur aufweist, die sich annähernd auch in den weiteren Bauabschnitten wiederfinden lässt. Wie in Abbildung 2 zu sehen, befindet sich das Gebäude im südlichen Teil von Block 9 und ist ein viergeschossiger Riegelbau.

ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN UND AUSWAHL DER BAUTEILSCHICHTEN

Für das erwähnte Beispielgebäude wurden die Massen der gewählten Aufbauten für alle Außenwände, Decken und Dächer errechnet. Lediglich das Fundament ist als Stahlbetonsohle geplant. Zur Vereinfachung wird kein Keller berücksichtigt. Ebenso wenig wurde ein bestimmtes statisches Tragwerkssystem festgelegt. Die Wand- und Deckenelemente haben demnach keinen statischen Anspruch. Das Gebäude ist in der Gebäudeklasse 4 einzuordnen. Um annähernd realistische Werte in Bezug auf die Holz- und Baustoffanteile zu ermitteln, sind die Massen der Wandelemente mit zwei Fensterausschnitten eines Standardformates je 7 m Wandabschnitt berechnet worden. Die Aufbauten aller Versionen sind so gewählt, dass sie so weit wie möglich die gleichen Anforderungen an den Wärmeschutz, Brandschutz und ggf. Schallschutz erfüllen (siehe folgende Darstellungen).

MINDESTANFORDERUNGEN AUSSENWANDAUFBAU

| | |
|-----------------------------------|---|
| Fassadenebene | Wärmeschutz: 0,16 W/(m ² K) |
| Konstruktions- und Wärmedämmebene | Brandschutz: mind. REI 30 |
| Innenbekleidung | Schallschutz: L _{nw} = / R _w = / |

MINDESTANFORDERUNGEN GESCHOSSDECKE

| | |
|------------------------------------|---|
| Fußbodenaufbau | Wärmeschutz: -/- W/(m ² K) |
| Konstruktions- und Schalldämmebene | Brandschutz: mind. REI 60 |
| Deckenbekleidung | Schallschutz: L _{nw} = <53 dB / R _w = >54 dB |

MINDESTANFORDERUNGEN AUFBAU RETENTIONSdach

| | |
|-----------------------------------|--|
| Dachaufbau | Wärmeschutz: 0,16 W/(m ² K) |
| Konstruktions- und Wärmedämmebene | Brandschutz: mind. REI 60 |
| Deckenbekleidung | Schallschutz: L _{nw} = <53 dB / R _w = / |

FUNKTIONSSCHICHTEN

Die Bauteilaufbauten wurden aufgrund der zuvor genannten und dargestellten bauphysikalischen Anforderungen gewählt. Eine wirtschaftliche Gegenüberstellung der unterschiedlichen Aufbauten wird in dieser Studie nicht vorgenommen, kann aber den Inhalt einer Folgestudie darstellen.

Die Systemgrenzen innerhalb der Berechnungen der Konstruktionen sind vergleichbar gewählt. Obgleich in dieser Betrachtung die Komponente des Bauteils (Konstruktions- und Wärmedämmebene) im Vordergrund steht, wurde jedes Bauteil zusätzlich in drei Ebenen aufgeteilt, um die Funktionsschichten der Bauteile untereinander [blau, rot, grün] vergleichen zu können. Auch unterschiedliche innenseitige Beplankungen, Fassadenschichten, abgehängte Deckensysteme und Fußbodenaufbauten können in einer globalen Betrachtung aller Massen einen Unterschied für die Gesamtkonstruktion bedeuten.

DIE BAUTEILE SIND WIE FOLGT IN FUNKTIONSSCHICHTEN AUFGETEILT

Außenwände

Fassadenhaut,
Wärme- und Konstruktionsebene,
innere Beplankung

Geschossdecken

Fußbodenaufbau,
Konstruktions- und Schalldämmebene,
Deckenbekleidung (teilweise mit Brandschutzfunktion)

Dächer

Dachbegrünung,
Konstruktions- und Wärmedämmebene,
Deckenbekleidung

Alle Dächer werden als Retentionsdach ausgeführt. Zur Vereinfachung wird das gleiche Begrünungssystem bei allen Dachaufbauten angenommen. Um eine weitere Variation (unterschiedlicher Baustoff) im Dachaufbau zu erhalten, wurden unterschiedliche Aufdachdämmsysteme gewählt. Die Dämmungen reichen von druckfester Holzfasern, über druckfeste Mineralwolle bis zu XPS und Schaumglas. Die Unterschiede in Bezug auf die Nachhaltigkeit der Baustoffe in Herstellung, Wärmedämmfunktion und Langlebigkeit werden bei näherer Betrachtung deutlich.

ARTEN DER BAUKONSTRUKTION MINERALISCH

ZIEGELBAU

SEITE 15 | 16

Die Außenwand besteht aus kammergedämmten Ziegeln (mit Mineralwolle). Als Fassadenhaut werden Sichtsteine auf einer Holzunterkonstruktion befestigt. Innenseitig schließt die Wand mit einem Kalkputz ab. Das Geschossdeckenelement ist eine Ziegeleinhängendecke, bestehend aus einem Ziegelkern und Streifen aus Vergussbeton mit entsprechender Bewehrung zur Aussteifung. Als Fußbodenaufbau wird ein schwimmender Estrich und eine Trittschalldämmende Schicht aus Mineralwolle festgelegt. Raumseitig werden ein Kalkputz verwendet und die Flachdachkonstruktion wird aus vorgefertigten Elementen in Form einer Ziegeleinhängendecke berechnet. Das Dachelement wird als Ziegeleinhängendecke ausgeführt. Unter dem Retentionsdachaufbau wird eine Aufdachdämmplatte aus druckfester Steinwolle verlegt.

KALKSANDSTEIN/STAHLBETONBAU

SEITE 17 | 18

Die Außenwandstruktur besteht aus einer Kalksandsteinwand mit einer vlieskaschierten Mineralwollplatte und einer speziellen Fassadenplatte aus komprimierter Kohle, die auf einer Holzunterkonstruktion befestigt ist. Innenseitig wird die Wand mit Gipsputz verputzt. Die Geschossdecke und die Dachkonstruktion werden gemäß herkömmlicher Bauweisen im Geschosswohnungsbau in Stahlbetonbauweise gewählt. Beim Fußbodenaufbau der Geschossdecke ist eine Mineralwollplatte zur Trittschalldämmung unter einem schwimmenden Estrich verlegt. Raumseitig wird ein Kalkputzsystem unterseitig auf dem Deckenelement aufgebracht. Das Dach erhält eine Aufdachdämmung aus Foamglas.

ARTEN DER BAUKONSTRUKTION HOLZBASIERT

HOLZLEICHTBAU

SEITE 19 | 20

Ein Holzleichtbausystem hat den Vorteil, maximal ressourceneffizient zu sein, wenn die Gurte aus Furnierschichtholz als Stegträgersystem gefertigt werden. Die Gurte bestehen aus hoch belastbarem Furnierschichtholz und die Stege aus Hartfaserplatten. Der Zwischenraum zwischen den vertikalen Gurten wird, genau wie beim Holzrahmenbau, als Dämmebene genutzt und hat gegenüber dem Massivholzbau den Vorteil, schlankere Wandaufbauten erzeugen zu können. Die gewählte Wand wird mit einer Zellulose-Einblasdämmung zwischen den Stegträgern und einer außenseitig abschließenden Holzfaserdämmplatte ausgebildet. Als Fassadenhaut wird eine hinterlüftete Faserzementplatte auf einer Holzunterkonstruktion geplant. Innenseitig schließt eine OSB-Platte die gedämmte Stahlträgerkonstruktion ab und wird zusätzlich mit einer Lehm- bauplatte beplankt, die sowohl raumklimatische Vorteile als auch Brandschutzfunktionen erfüllt. Die Geschossdecke wird innen mit einer weichen Holzfaserdämmmatte bestückt. Der Fußbodenaufbau ergibt sich aus einem beschwerenden System aus Pappwaben, gefüllt mit Sand und Holzfaserdämmplatten. Als raumseitiger Elementabschluss mit Schallschutz- und Brandschutzfunktion wird eine doppelte Gipsfaserplatte an einer Federschiene-Unterkonstruktion befestigt. Zusätzlich zum Deckenaufbau hat das Dach eine druckfeste Aufdachdämmung aus Holzfaserdämmplatte und raumseitig eine feuchtevariable Dampfbremse und eine Holzfaserdämmplatte.

HOLZRAHMENBAU

SEITE 21 | 22

Diese Außenwand in Form einer Holzrahmenkonstruktion ist eine typische ressourceneffiziente Holzbauweise mit oberen und unteren Rahmenhölzern und vertikalen Stielen, die einen Zwischenraum bilden, der idealerweise als Dämmebene (hier Zellulosedämmung) genutzt wird. Zur Aussteifung wird die Wand innenseitig mit einer OSB-Platte beplankt und nach außen hin mit einer Holzfaserdämmplatte verschlossen. Die Fassadenhaut besteht aus einer hinterlüfteten Holzschalung. Das gewählte Fußbodensystem der Holzbalkendecke besteht aus einem Trockenestrich aus Naturstein als Beschwerung zur Verbesserung des Schallschutzes, Holzweichfaserplatten und einer Ausgleichsschicht aus mineralisierten Holzspänen. Das System ist laut Hersteller nach seiner Nutzungsphase wieder verwendbar oder kann dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden.

Zwischen den Balken befindet sich eine Holzfaserdämmmatte als zusätzlicher Schallschutz. Als Deckenbekleidung wird eine Gipsfaserplatte an einer Unterkonstruktion aus Federschiene als zusätzliche Schallentkopplung montiert. Das Dachelement unterscheidet sich nur in wenigen Punkten. Als Hohlraumdämmung wird eine Mineralwolle gewählt und die Aufdachdämmung besteht aus einer druckfesten Holzfaserdämmplatte.

BRETTSPERRHOLZ

SEITE 23 | 24

Ein Brettsperrholz-Element (BSP/CLT) als Außenwand ist bereits ein steifes Holzelement, das aus flächig verklebten Holzlamellen besteht. Als außenseitige Dämmschicht wird eine Holzweichfaserplatte zwischen vertikal und horizontal ausgebildeten Furnierschichtholzgurten ausgebildet, die mittels einer steifen Holzfaserdämmplatte als Putzträgerplatte nach außen hin verschlossen wird und mit einem mineralischen Putzsystem abschließt. Innenseitig bleibt die Wand holzsichtig. Auf die Brettsperrholzdecke wird ein Fußbodensystem mit einer typischen Trockenestrichplatte aus Gipsfaser mit einer unterseitigen Holzfaserdämmplatte als Trittschalldämmung und einer elastisch gebundenen Schüttung als Beschwerung und zu Schallschutzzwecken verlegt. Unterseitig bleibt das Brettsperrholz-Deckenelement holzsichtig. Als Aufdachdämmung des BSP-Deckenelementes wird eine XPS-Hartschaumplatte oberseitig berücksichtigt.

VOLLHOLZBAU – THOMA HOLZ100

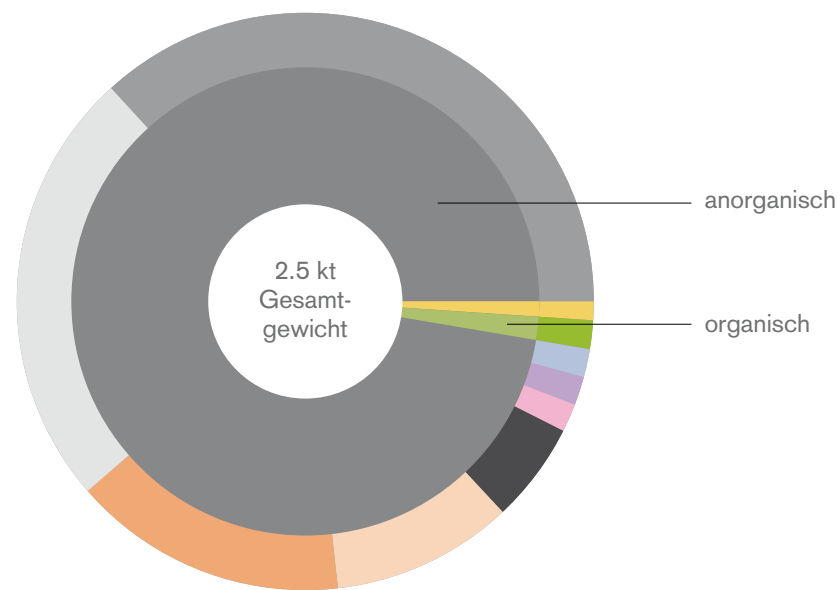
SEITE 25 | 26

Als Strukturelement wird ein Vollholzelement gewählt. Die Besonderheit der Thoma Holz GmbH ist die Verwendung von Mondholz und die Verbindung der kreuzweise und diagonal verlegten Holzbretter durch gepresste Buchendübel. Dieses Massivholzsystem ist frei von Leim und Klebstoffen. Das Vollholzelement wird mit einer Dämmplatte nach außen hin konstruiert, worauf die Fassadenhaut (eine vernutete Lärchenschalung) mittels einer Holzunterkonstruktion montiert wird. Raumseitig bleibt die Wand sichtbar. Das Geschossdeckenelement besteht aus einem Fußbodenaufbau aus verschiedenen Schichten Holzfaserdämmplatte, Estrichelementen und einer Wabenschüttung. Raumseitig bleibt das Element holzsichtig. Das Dach bekommt eine Aufdachdämmung aus einer druckfesten Holzfaserdämmplatte.

2.1.1 MINERALBASIERTE ARTEN DER BAUKONSTRUKTION

2.1.1.1 ZIEGEL

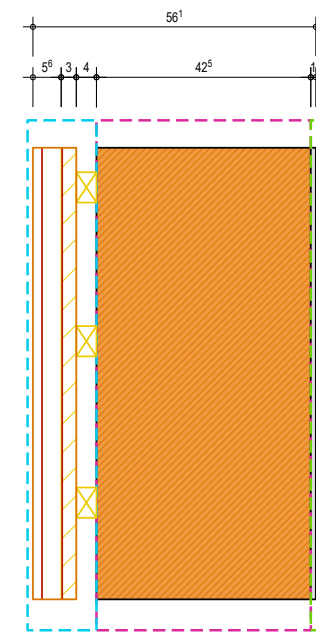
Die konventionelle ziegelbasierte Bauweise hat ein Gesamtgewicht von 2,5 kt und besteht aus den beiden Hauptkomponenten Ziegel (37 %) und Beton (25 %), wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Für die Rohdecken verwendeter Fließestrich macht 18 % des Gesamtgewichts des Gebäudes aus und Intensivsubstrat i-leicht, das auf das Dach aufgebracht wird, ist für 8 % verantwortlich. Weitere anorganische Materialien sind Putz mit 5 % und Mineralwolle, Mineralfaserplatten und Steinwollendämmung, die jeweils 2 % zum Gesamtgewicht beitragen. Im Vergleich dazu ist der Gewichtsanteil an organischem Material sehr gering (etwa 2 %). Der Rest der Baustoffe macht weniger als 1 % des Gewichts aus.



| BAUSTOFFE | |
|------------------------|---------------------------|
| 37 % | Ziegel |
| 25 % | Beton |
| 18 % | Fließestrich |
| 8 % | Intensivsubstrat i-leicht |
| 5 % | Putz |
| 2 % | Mineralwolle |
| 2 % | Mineralfaserplatten |
| 2 % | Steinwolle |
| 2 % | Holzaukleidungen |
| 1 % | sonstige Materialien |
| unter 1 % des Gewichts | |

→ **Abbildung 3**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Ziegelbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND



außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 86 mm Petersen-Tegl-Cover Stein
- 30 mm Konterlattung Holz
- 40 mm Traglattung Holz

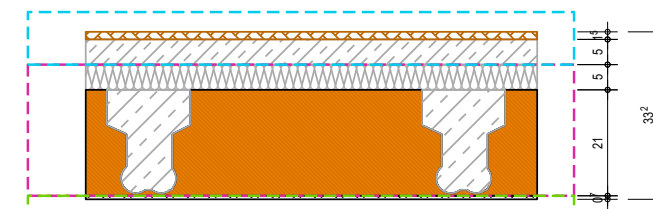
- 425 mm Ziegelmauerwerk Thermoplan MZ7 (Mineralwolle-gedämmt)

- 10 mm Kalkputz

Konstruktionshinweis Petersen-Tegl Stein

→ **Abbildung 4**
Aufbau der Außenwand in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

ROHDECKEN



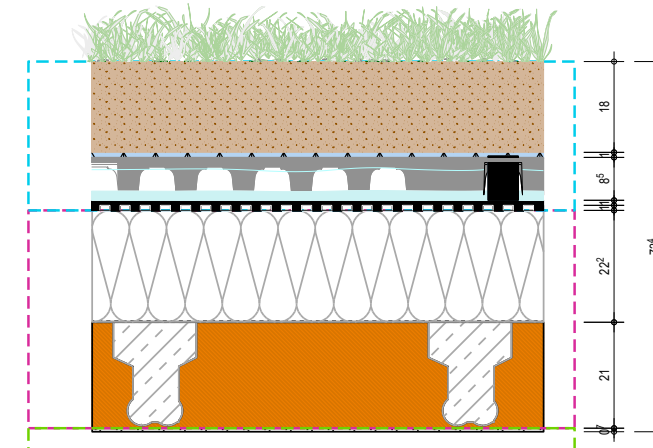
- 15 mm Parkett
- 50 mm schwimmender Estrich
- 0.5 mm Trennlage - PE Folie

- 50 mm Trittschalldämmung Mineralwolle
- 210 mm Ziegel-Element Einhängendecke inkl. Betonverfüllung - Vergussbeton C25/30 - 38 lt/m² (Berechnung ohne Stahl)

- 7 mm Kalkputz

→ **Abbildung 5**
Aufbau der Rohdecken in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH



- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies
- (5,2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM Dachbahn

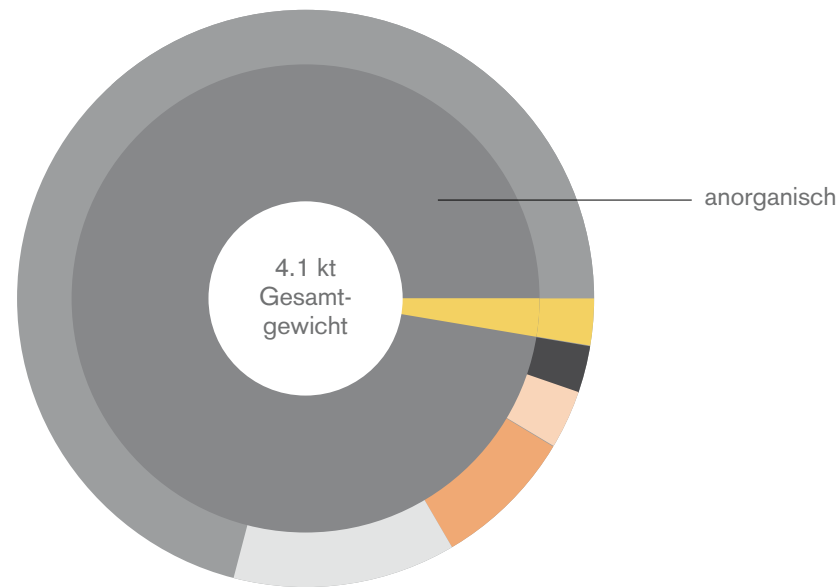
- 220 mm Rockwool Hardrock 038 (druckfest)
- 2 mm Dampfsperre
- 210 mm Ziegel-Element Einhängendecke (ohne Aufbeton)

- 7 mm Putz

→ **Abbildung 6**
Aufbau des Dachs in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

2.1.1.2 STAHLBETON

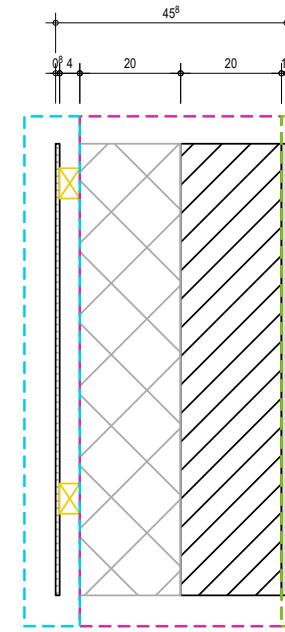
Stahlbeton ist die schwerste Art der Baukonstruktion, mit einem Gesamtgewicht von 4,1 kt (Abbildung 7). Dies ist auf den hohen Anteil an Stahlbeton in den Rohdecken und im Dach zurückzuführen, der 62 % des Gesamtgewichts ausmacht. In den Wänden ist Kalkstein das schwerste Material, es ist für 14 % des Gesamtgewichts verantwortlich. Fließestrich wird nur für die Deckenkonstruktion verwendet, macht aber 11 % des Gesamtgewichts aus. Sonstige Materialien sind Intensivsubstrat i-leicht (auf dem Dach 5 %), Putz (4 %) und weitere Baustoffe, die jeweils weniger als 1 % des Gesamtgewichts ausmachen (Tabelle 2). Fast die gesamte Art der Baukonstruktion besteht aus anorganischen Materialien, mit Ausnahme eines sehr kleinen Anteils.



| BAUSTOFFE | |
|-----------|---|
| 62 % | Stahlbeton |
| 14 % | Kalkstein |
| 11 % | Fließestrich |
| 5 % | Intensivsubstrat i-leicht |
| 4 % | Putz |
| 4 % | sonstige Materialien unter 1 % des Gewichts |

→ **Abbildung 7**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Stahlbetonbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND

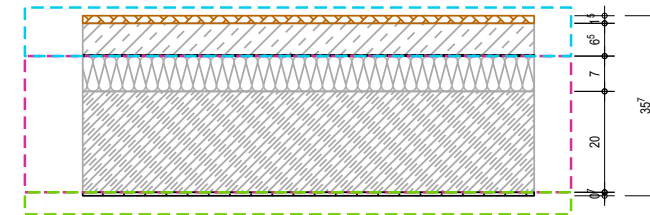


außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 8 mm Made-of-Air-Fassadenplatte
- 40 mm Holzunterkonstruktion
- 200 mm Mineralwolle 040 - vlieskaschiert
- 200 mm Kalksandsteinmauerwerk
- 10 mm Gipsputz

→ **Abbildung 8**
Aufbau der Außenwand in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

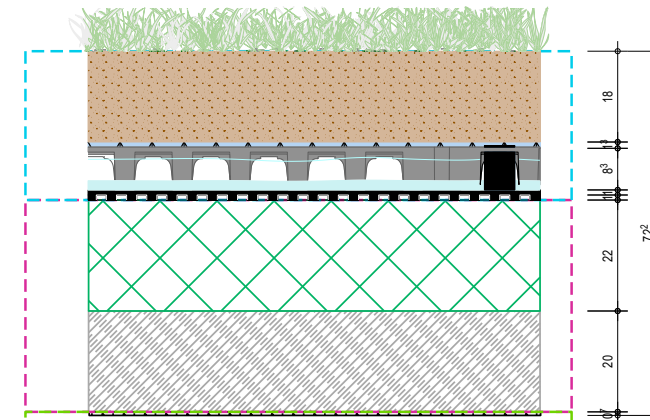
ROHDECKEN



- 15 mm Parkett
- 65 mm schwimmender Estrich
- 0.2 mm Trennlage PE-Folie
- 70 mm Trittschalldämmung Mineralwolle
- 200 mm Stahlbetondecke
- 7 mm Kalkputz

→ **Abbildung 9**
Aufbau der Rohdecken in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH



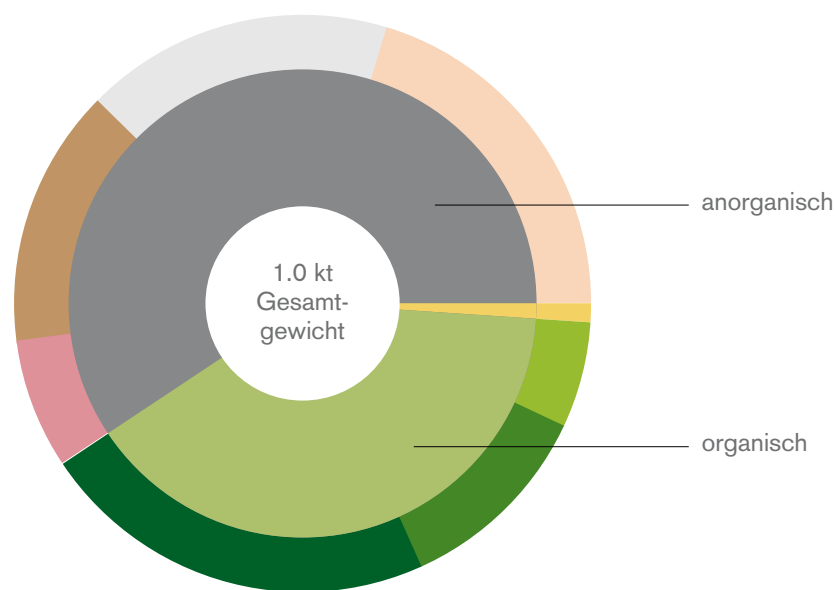
- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarlvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies (5,2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM-Dachbahn
- 220 mm FOAMGLAS-Platte T3+
- 2 mm Dampfsperre
- 200 mm Stahlbetonelement
- 7 mm Kalkputz

→ **Abbildung 10**
Aufbau des Dachs in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

2.1.2 HOLZRAHMEN-LEICHTBAUWEISEN

2.1.2.1 HOLZLEICHTBAU

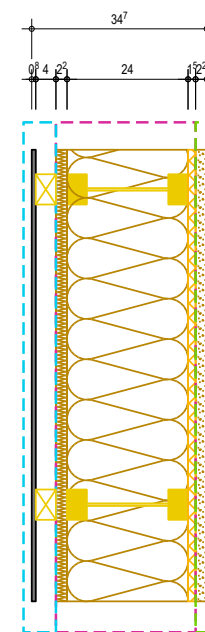
Die Holzleichtbauweise ist mit einem Gesamtgewicht von 1 kt die leichteste Bauweise im Vergleich zu allen anderen (Abbildung 11). Im Gegensatz zu konventionellen Bauweisen zeichnet sich die Holzleichtbauweise durch ihren hohen Anteil an organischen Materialien aus, einschließlich der kombinierten Materialgruppen für die Holzstruktur (18 %), Holzfaserdämmung (14 %) und Holzaukleidungen (7 %). Der größte Anteil an anorganischem Material entfällt auf das Intensivsubstrat i-leicht, das auf dem Dach verwendet wird und 20 % des Gesamtgewichts des Gebäudes ausmacht. Gipsfaserplatten haben mit 17 % ebenfalls einen hohen Gewichtsanteil, gefolgt von Trockenestrich (16 %) und mineralbasierten Platten (8 %). Sonstige Materialien, die jeweils weniger als 1 % des Gesamtgewichts ausmachen, sind im Anhang aufgeführt (Tabelle 2).



| BAUSTOFFE | |
|------------------------|---------------------------|
| 20 % | Intensivsubstrat i-leicht |
| 17 % | Gipsfaserplatten |
| 16 % | Trockenestrich |
| 8 % | mineralbasierte Platten |
| 18 % | Holzstruktur |
| 14 % | Holzfaserdämmung |
| 7 % | Holzaukleidungen |
| 1 % | sonstige Materialien |
| unter 1 % des Gewichts | |

→ **Abbildung 11**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Holzleichtbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND

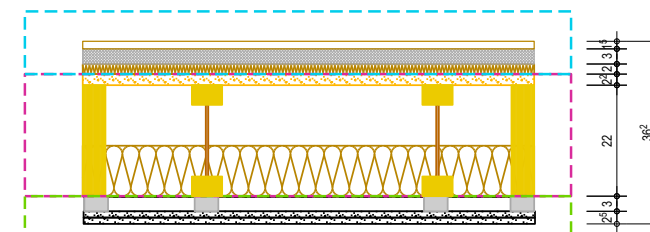


außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 8 mm Faserzementplatte
- 40 mm Traglattung
- 1mm Winddichtungsfolie
- 22 mm Holzfaserdämmplatte STEICOuniversal
- 240 mm STEICOWall Stegräger 240 mm (240 mm Zellulosedämmung - STEICOfloc)
- 15 mm OSB-Platte
- 22 mm Lehmbauplatte

→ **Abbildung 12**
Aufbau der Außenwand in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

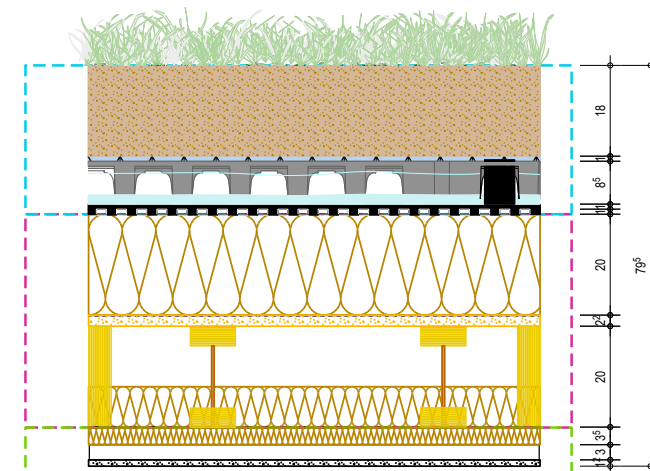
ROHDECKEN



- 15 mm Parkett
- 30 mm Wolf-PhoneStar
- 20 mm Trittschall-Holzfaserdämmplatte - STEICOtherm
- 22 mm OSB
- 220 mm STEICOjoist
- 100 mm Holzfaserdämmung
- 0.2 mm Rieselschutz
- 2.7 mm Federschiene
- 25 mm (2x1.5) GF-Platte (Spannweite max. 400 mm)

→ **Abbildung 13**
Aufbau der Rohdecken in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH

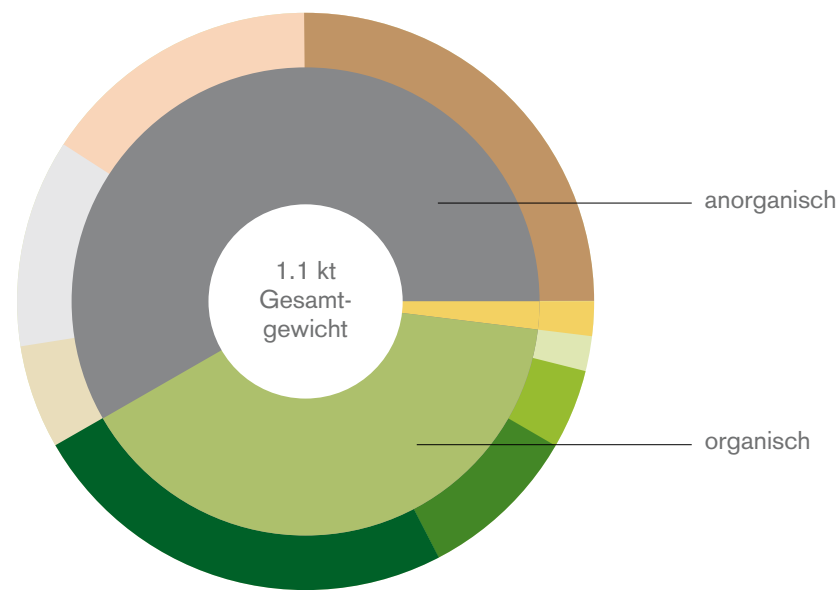


- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies (5.2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM-Dachbahn
- 200 mm Holzfaserdämmplatte druckfest - STEICRoof dry
- 2 mm Dampfsperre
- 22 mm OSB
- 200 mm STEICOjoist Träger 3.9/9 cm (80 mm Holzfaserdämmplatte - STEICOzell)
- 2 mm STEICOmuli renova - feuchtevariable Dampfsperre
- 35 mm HFD-Platte STEICOuniversal
- 27 mm Federschiene
- 15 mm Gipsfaserplatte

→ **Abbildung 14**
Aufbau des Dachs in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

2.1.2.2
HOLZRAHMENBAU

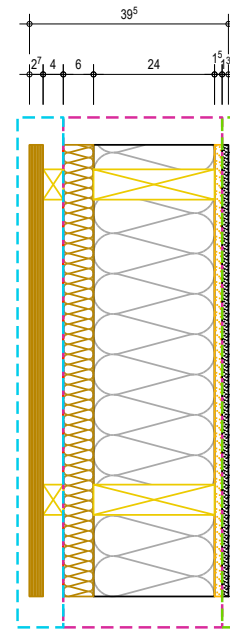
Die Holzrahmenbauweise ist mit einem Gesamtgewicht von 1,1 kt fast so leicht wie die Holzleichtbauweise (Abbildung 15). Ähnlich wie bei der Holzleichtbauweise wird dabei ein hoher Prozentanteil an organischen Baustoffen verwendet, darunter die kombinierten Baustoffgruppen für die Holzstruktur (21 %), Holzfaserdämmung (10 %) und Holzauskleidung (5 %) sowie die Zellulosedämmung (2 %). Hier sind Trockenestrich (24 %) und Intensivsubstrat i-leicht (17 %) für den größten Anteil anorganischer Materialien am Gesamtgewicht des Gebäudes verantwortlich, gefolgt von Gipsfaserplatten (14 %) und Füllkalksplitt (6 %). Sonstige Materialien, die jeweils weniger als 1 % des Gesamtgewichts ausmachen, sind im Anhang aufgeführt (Tabelle 2).



| BAUSTOFFE | |
|------------------------|---------------------------|
| 24 % | Trockenestrich |
| 17 % | Intensivsubstrat i-leicht |
| 14 % | Gipsfaserplatten |
| 6 % | Füllkalksplitt |
| 21 % | Holzstruktur |
| 10 % | Holzfaserdämmung |
| 5 % | Holzauskleidungen |
| 2 % | Zellulosedämmung |
| 2 % | sonstige Materialien |
| unter 1 % des Gewichts | |

→ **Abbildung 15**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Holzrahmenbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND

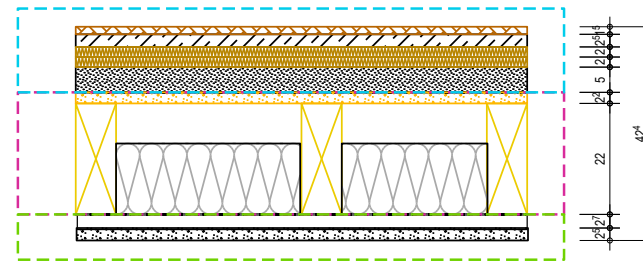


außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 27 mm Lärchenschalung
- 40 mm Lattung (Hinterlüftungsebene)
- 1 mm Winddichtungsfolie
- 60 mm Holzfaserdämmplatte
- 240 mm KVH-Konstruktion (240 mm Zellulosedämmung)
- 15 mm OSB-Platte
- 1,25 mm Gipsfaserplatte (GKF)

→ **Abbildung 16**
Aufbau der Außenwand in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

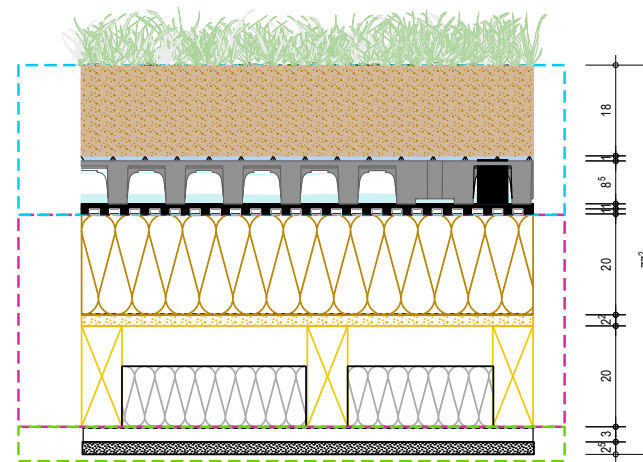
ROHDECKEN



- 15 mm Parkett
- 25 mm Lithotherm Trockenestrich LW86
- Granit (68kg/m²)
- 20 mm Lithowood Holzweichfaserplatte 5 kg/m²
- 20 mm Lithowood Trittschallplatte 3,2 kg/m²
- 50 mm LW10 Trockenschüttung Cemwood ca. 16 kg/m²
- 0,2 mm Rieselschutz
- 22 mm OSB-Platte
- 220 mm Holzbalken 220 x 80 mm
- 140 mm Holzfaserdämmmatte
- 0,2 mm Rieselschutz
- 2,7 mm Federschiene
- 25 mm Gipsfaserplatte 2 x 12,5 mm

→ **Abbildung 17**
Aufbau der Rohdecken in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH



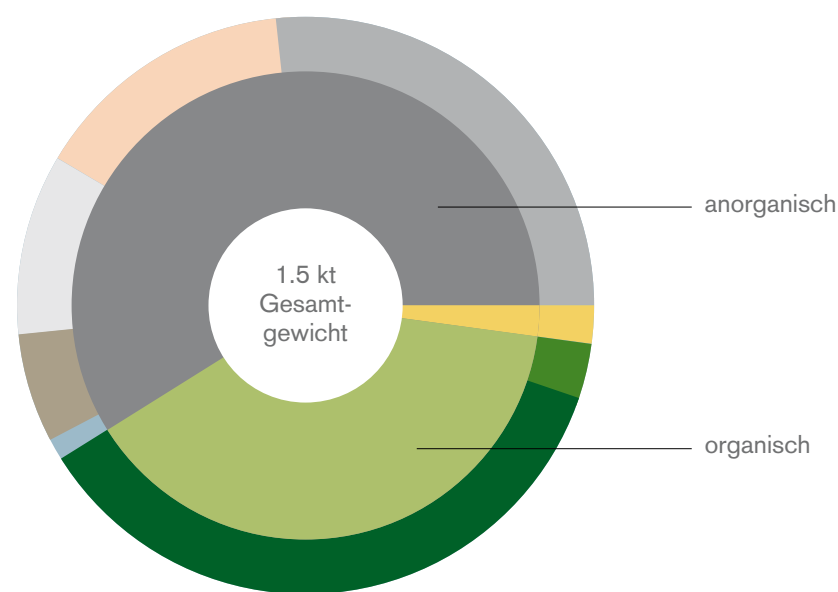
- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies
- (5,2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM Dachbahn
- 200 mm Holzfaserdämmung – druckfest STEICOroof dry
- 1 mm Dampfsperre
- 22 mm OSB Platte
- 200 mm Holzbalken (120 mm Rockwool Klemmrock 035)
- 0,2 mm Rieselschutz
- 27 mm Federschiene
- 25 mm Gipsfaserplatte 2 x 12,5 mm

→ **Abbildung 18**
Aufbau des Dachs in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

2.1.3 MASSIVHOLZBAUWEISEN

2.1.3.1 MASSIVHOLZBAU

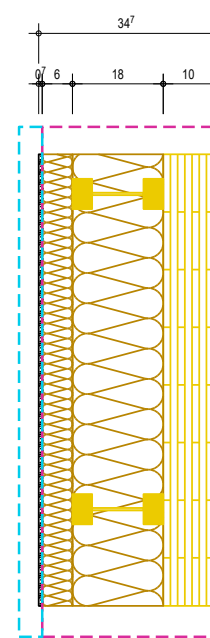
Mit einem Gewicht von 1,5 kt ist die Massivholzbauweise schwerer als Holzrahmen-Leichtbauweisen (Abbildung 19). Im Gegensatz zu mineralbasierten Arten der Baukonstruktion werden für den Massivholzbau hauptsächlich biomassebasierte Baustoffe verwendet. Die kombinierte Materialgruppe für die Holzstruktur ist für 40 % des Gesamtgewichts verantwortlich, wobei Brettsperrholz (CLT) das Hauptmaterial ist und einen großen Anteil des Gesamtgewichts ausmacht. Die Holzfaserdämmung macht nur 3 % des Gewichts aus. Den größten Anteil an anorganischem Material im Verhältnis zum Gebäudegewicht machen elastische Verbundfüllstoffe mit 26 % aus, die für die Rohdecken verwendet werden, gefolgt vom Intensivsubstrat i-leicht (12 %), das auf das Dach aufgebracht wird. Gipsfaserplatten (9 %), Deckenplatten (6 %) und mineralischer Putz (1 %) sind weitere Komponenten. Sonstige Materialien, die jeweils weniger als 1 % des Gesamtgewichts ausmachen, sind im Anhang aufgeführt (Tabelle 2).



| BAUSTOFFE | | |
|-----------|------------------------------|------------------------|
| 26 % | elastische Verbundfüllstoffe | 90 kg/m ² |
| 12 % | Intensivsubstrat i-leicht | |
| 9 % | Gipsfaserplatten | |
| 6 % | Deckenplatten | |
| 1 % | mineralischer Putz | |
| 40 % | Holzstruktur | |
| 3 % | Holzfaserdämmung | |
| 2 % | sonstige Materialien | unter 1 % des Gewichts |

→ **Abbildung 19**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Massivholzbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND

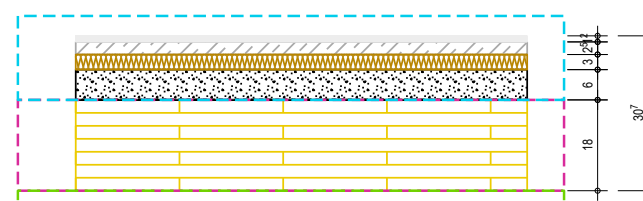


außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 7 mm mineralisches Putzsystem
- 60 mm HFD-Platte STEICOprotect Typ M
- 180 mm STEICOjoist Träger
- 180 mm HFD-Matte STEICOflex 036
- 100 mm Brettsperrholzelement
- Sichtbare Holzoberfläche

→ **Abbildung 20**
Aufbau der Außenwand in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

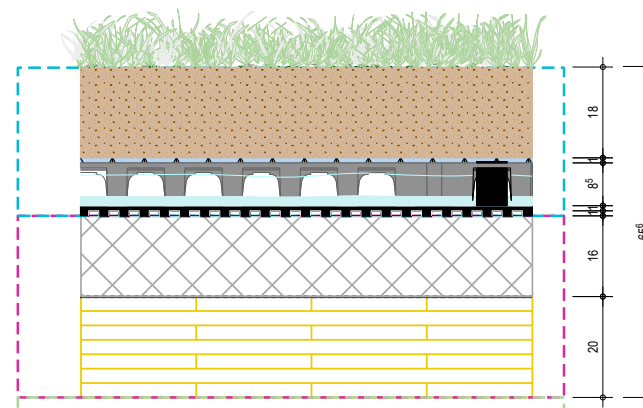
ROHDECKEN



- 12 mm Fliesen
- 25 mm Trockenestrich
- 30 mm Trittschall-Holzfaserdämmplatte
- 60 mm Schüttung elastisch gebunden (ca. 90kg/m²)
- 0,2 mm Rieselschutz
- 180 mm Brettsperrholzelement
- Holz-sichtigkeit

→ **Abbildung 21**
Aufbau der Rohdecken in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH



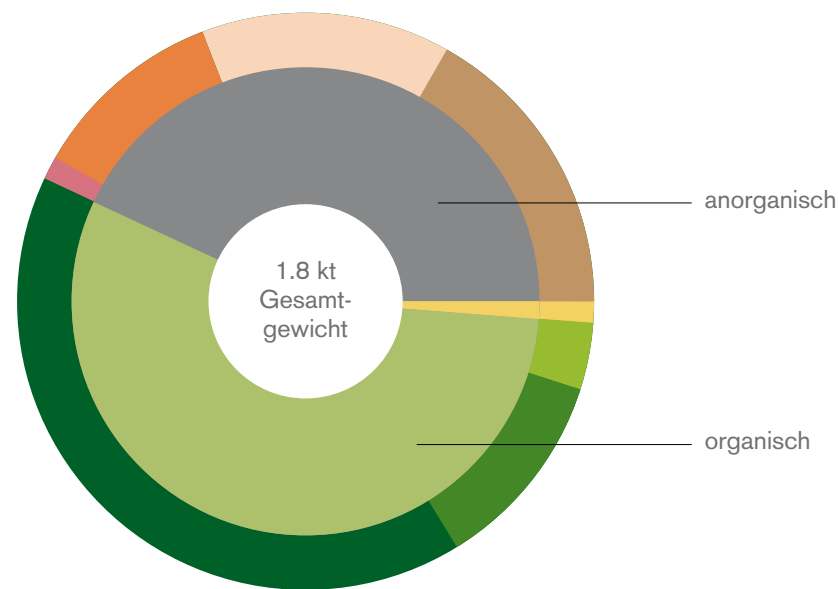
- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies
- (5,2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM Dachbahn
- 140 mm Hartschaum XPS 035-Dämmung
- 5 mm Dampfsperre
- 200 mm Brettsperrholzelement
- Holz-sichtigkeit

→ **Abbildung 22**
Aufbau des Dachs in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

2.1.3.2
THOMA HOLZ100

Thoma Holz100 ist eine spezielle Art des Massivholzbaus, die von der Thoma Holz GmbH aus Österreich entwickelt wurde. Bei dieser Bauweise werden keine Metalle, Chemikalien, Holzschutzmittel oder Klebstoffe eingesetzt. Stattdessen werden die Gebäudeteile durch mechanische Verbindungen mit Holzdübeln verbunden (Thoma Holz GmbH, o. D.). Nach Angaben der Thoma Holz GmbH wird der Ernteprozess optimiert, indem das Holz bei abnehmendem Mond geschlagen wird. Das so gewonnene Holz soll dichter und robuster und im Vergleich zu konventionell geerntetem Holz weniger anfällig für Schädlinge sein (Thoma Holz GmbH, 2020). Diese Annahme basiert auf einer Studie, die 2001 von der ETH Zürich durchgeführt wurde (Zürcher, 2001). Abgesehen von dieser Studie lassen sich jedoch keine aktuellen Quellen finden, die diese Ergebnisse untermauern.

Mit einem Gesamtgewicht von 1,8 kt ist die Thoma-Holzbauweise schwerer als Massivholzbau (Abbildung 23). Im Gegensatz zu allen anderen Bauweisen ist der Großteil der Baustoffe biomassebasiert und besteht aus Holz, wie an dem deutlich höheren Anteil an organischem Material in Abbildung 23 ersichtlich ist. Die aggregierte Gruppe der Holzstruktur macht 44 % aus und umfasst hauptsächlich das Material Thoma Holz100. Holzfaserdämmung macht 11 % aus und Holzaukleidungen sind für 3 % des Gesamtgewichts des Gebäudes verantwortlich. Den größten Anteil an anorganischem Material im Verhältnis zum Gebäudegewicht macht Fermacell I-Wabenfüllstoff mit 19 % aus, der für die Rohdecken verwendet wird, gefolgt von Intensivsubstrat i-leicht (11 %), das auf das Dach aufgebracht wird, Best-Estrich (10 %) und Mineralfaserplatten (1 %). Sonstige Materialien, die jeweils weniger als 1 % des Gesamtgewichts ausmachen, sind im Anhang aufgeführt (Tabelle 2).



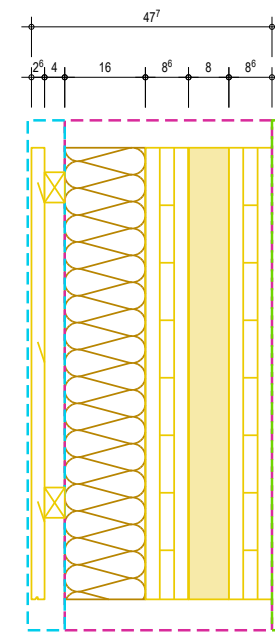
BAUSTOFFE

| | |
|------|----------------------------|
| 19 % | Fermacell I-Wabenfüllstoff |
| 11 % | Intensivsubstrat i-leicht |
| 10 % | Best-Estrich |
| 1 % | Mineralfaserplatten |
| 44 % | Holzstruktur |
| 11 % | Holzfaserdämmung |
| 3 % | Holzaukleidungen |
| 1 % | sonstige Materialien |

unter 1 % des Gewichts

→ **Abbildung 23**
Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Thoma-Holzbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten.

WAND

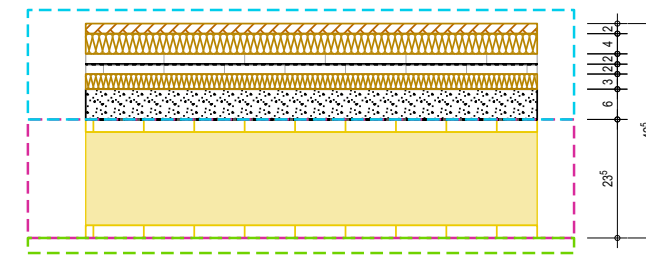


außen nach innen | links nach rechts | hor. Schnitt

- 26 mm horizontal vernutet hinterlüftete Lärchenschalung
- 40 mm Traglattung Holz
- 160 mm HFD-Platte best wood Wall 180 (N+F)
- 85,5 mm kreuzweise/diagonal verl. Brettlagen
- 80 mm Vollholzkern mit Buchendübel
- 85,5 mm kreuzweise/diagonal verl. Brettlagen
- Sichtbare Holzoberfläche

→ **Abbildung 24**
Aufbau der Außenwand in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

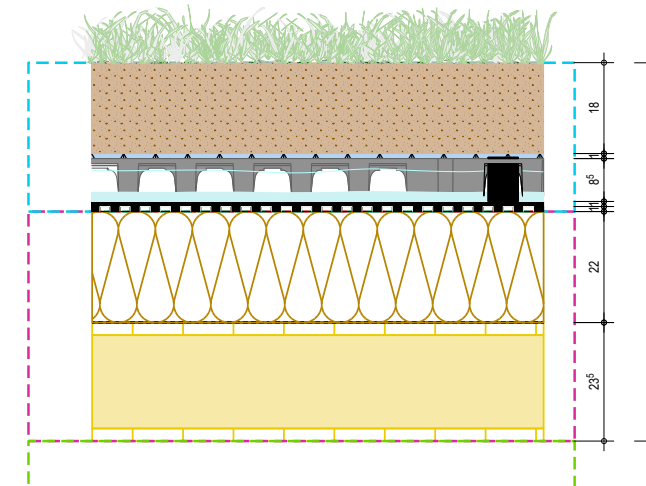
ROHDECKEN



- 20 mm Massivholzdielen
- 40 mm Holzfaserdämmplatte
- 20 mm Estrichelement (stirnseitig verklebt) rauchdicht
- 0,2 mm Kraftpapier-Rieselschutz
- 20 mm Estrichelement (auf Lücke verlegt)
- 30 mm Trittschalldämmung – Isover Akustic EP1e
- 60 mm Fermacell-Wabenschüttung in Estrichwabe
- 0,2 mm Kraftpapier-Rieselschutz
- 235 mm Thoma Holz100 Deckenelement
- Holzichtigkeit

→ **Abbildung 25**
Aufbau der Rohdecken in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

DACH



- 180 mm Intensivsubstrat
- 5 mm Saugkapillarvlies
- 85 mm Retentionsboxen
- 5 mm Speichervlies
- (5,2 mm Durchwurzelerschutz)
- 1,5 mm EPDM-Dachbahn
- 300 mm HFD-Platte druckfest, 2-lagig
- 5 mm Dampfsperre
- 235 mm Thoma Holz100 Deckenelement
- Holzichtigkeit

→ **Abbildung 26**
Aufbau des Dachs in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023

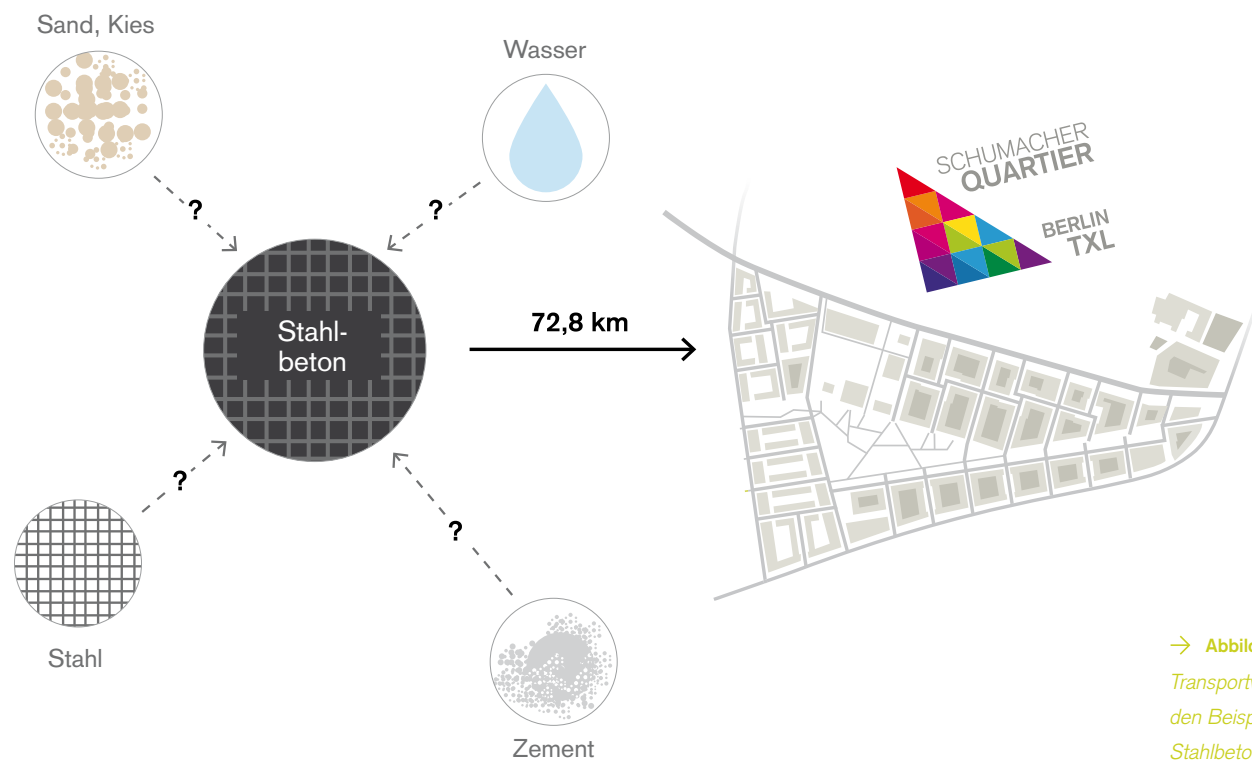
2.2 POTENZIELLE BAUSTOFFLIEFERANTINNEN UND -LIEFERANTEN

Der CO₂-Fußabdruck von Baustoffen schließt üblicherweise Treibhausgasemissionen während der Produktion und dem Transport von Rohstoffen zum Werk oder zum Lieferantinnen und Lieferanten oder weiter bis zur Baustelle mit ein (Dodd et al., 2021). Da manche Baustoffe aus mehreren Rohstoffen bestehen, ist es wichtig, die Transportwege für jede Komponente zu kennen, um die Gesamtemissionen für die Produktionsphase zu berechnen. Es gibt jedoch teilweise einen Mangel an zuverlässigen und transparenten Daten zu den spezifischen Lieferketten von Baustoffen. Außerdem ist die endgültige Wahl der Baustofflieferantinnen und -lieferanten der Bauträgerin oder dem Bauträger überlassen. Deshalb legt die durchgeführte Analyse den Fokus auf Transportemissionen des fertigen Baustoffs – von der nächsten Anbieterin oder dem Anbieter bis zur Baustelle in Berlin. Daher wurden unter Umständen nicht alle Transportwege für alle Materialkomponenten entlang der gesamten Lieferkette in die Berechnungen der Transportemissionen einbezogen, wie in Abbildung 27 am Beispiel des Baustoffs Stahlbeton illustriert.

Zur Identifizierung von geeigneten Anbietern wurden Einträge in Google Maps nach ihrer Relevanz gefiltert und

anhand ihrer Entfernung zur Baustelle in Berlin ausgewählt. Es gab keine weiteren ausschlaggebenden Kriterien, außer in einigen Fällen, in denen bestimmte Anbieter bereits von dem Projektmanagement des Schumacher Quartiers ausgewählt wurden. Dies betrifft die Made of Air GmbH, Pittsburgh Corning Europe NV, Petersen-Tegl A/S, die Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG und die Thoma Holz GmbH. Die Transportwege für Baustoffgruppen für jede Art der Baukonstruktion sind in Tabelle 1 im Anhang enthalten.

In Deutschland werden Baustoffe und andere Waren hauptsächlich auf dem Landweg transportiert. Zu den am häufigsten eingesetzten Transportarten gehören der Schienen- und LKW-Transport sowie der Transport mit Lieferwagen. Die Berechnungen der Transportemissionen in der CCA gehen von der Annahme aus, dass die Baustoffe auf dem Landweg mit einem motorisierten Fahrzeug transportiert werden (LKW). LKW haben den größten Anteil am Warentransport in Deutschland (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2023). Nach Angaben des Britischen Ministeriums für Umwelt, Ernährung und ländliche Angelegenheiten (De Wolf et al., 2017) haben Lieferwagen und LKW mit der kleinsten Kapazität (3,5–7,5 t) den höchsten CO₂-Koeffizienten. Er entspricht $5,5731 \times 10^{-4} \text{ t CO}_2\text{eq t}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Der CO₂-Koeffizient sinkt mit steigender Kapazität des Lieferwagens bzw. LKWs: $3,6024 \times 10^{-4} \text{ t CO}_2\text{eq t}^{-1} \text{ km}^{-1}$ für LKW mit einem Ladegewicht von 7,5–17 t und $1,7398 \times 10^{-4} \text{ t CO}_2\text{eq t}^{-1} \text{ km}^{-1}$ für LKW mit einem Ladegewicht von mehr als 17 t (De Wolf et al., 2017).



→ **Abbildung 27**
Transportwege für den Beispielbaustoff Stahlbeton.

2.3 BESCHREIBUNG DES NUMERISCHEN ALGORITHMUS

Um die Kohlenstoffbindung und -emissionen aus der Produktion und dem Transport von Baustoffen zu bewerten, wurde eine Kohlenstoffbilanz (CCA) aufgestellt. Dabei handelt es sich um einen Algorithmus, der die Bindung und Flüsse von Kohlenstoff innerhalb der gebauten Umgebung und zwischen der gebauten Umgebung und Ökosystemen simuliert. Der unten beschriebene numerische Algorithmus ist eine Weiterentwicklung der Methodik zur Bewertung der kohlenstoffbezogenen Vorteile eines Übergangs zu Holzbauweisen zur Deckung des globalen Wohnungsbedarfs (Churkina et al., 2020). Die Bindung von Kohlenstoff in Baustoffen und damit verbundene Emissionen aus der Baustoffproduktion wurden für das gesamte Referenzgebäude sowie für seine Bestandteile, d. h. Außenwände, Rohdecken und das Dach, geschätzt.

Die Bindung von Kohlenstoff in einem Gebäude (C_s [t]) wird anhand der folgenden Gleichung als Summe der Kohlenstoffbindung in verschiedenen Baustoffen berechnet, die im Gebäude enthalten sind:

$C_s = \sum_i (M_i \times B_i \times CW)$, wobei Folgendes gilt: M_i – Masse der Baustoffe [t], wie Holz, Stahlbeton, Ziegel usw., die im Gebäude enthalten sind. Die Massen der in dieser Studie verwendeten Baustoffe sind in Tabelle 3 angegeben. B_i – Biomassefraktion des Materials [dimensionslos]. Die in dieser Studie verwendeten Fraktionen sind in Tabelle 1 angegeben.

CW = Kohlenstoff-Biomasse-Verhältnis [dimensionslos]. Die Berechnungen werden mit einem Kohlenstoff-Holz-Verhältnis von 0,5 durchgeführt, was dem auf die erste Dezimalstelle gerundeten weltweiten Durchschnitt von $0,476 \pm 0,04$ entspricht (Martin et al., 2018), falls auf den jeweiligen Datenblättern der Baustoffe kein Wert angegeben ist.

Die Kohlenstoffemissionen im Zusammenhang mit der Fertigung von Baustoffen (C_e [t]) werden anhand des Gewichts verschiedener Materialien und ihrer CO₂-Emissionsfaktoren berechnet. In unseren Berechnungen haben wir angenommen, dass alle Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung von Baustoffen CO₂ waren, siehe unten stehende Gleichung.

$C_{ep} = \sum_i (k_i \times M_i)$ Kohlenstoffemissionen im Zusammenhang mit der Produktion von Baustoffen, wobei Folgendes gilt: k_i – CO₂-Emissionsfaktor [t CO₂ eq./t] eines Baustoffs wie Holz, Stahlbeton, Ziegel usw. Die in dieser Studie verwendeten CO₂-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die mit dem Transport von Baustoffen zusammenhängenden Kohlenstoffemissionen (C_{et} [t]) von der nächstgelegenen Anbieterin oder dem Anbieter zur Baustelle im Schumacher Quartier, Berlin, wurden mithilfe der nachstehenden Gleichung eingeschätzt:

$C_{et} = \sum_i (k_{ti} \times M_i \times D_i)$, wobei Folgendes gilt: k_{ti} – CO₂-Emissionsfaktor verschiedener Transportmittel wie LKW, Schienentransport, Schiff usw. [t CO₂eq t⁻¹ km⁻¹]. Es wurde davon ausgegangen, dass alle Baustoffe für diese Baustelle mit einem LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5–7,5 t transportiert werden. Der CO₂-Emissionsfaktor dieses Transportmittels ist $5,5731 \times 10^{-4} \text{ t CO}_2\text{eq t}^{-1} \text{ km}^{-1}$.

D_i = Transportwege [km] für Baustoffe, geschätzt für die nächstgelegene Baustoffanbieterin oder den Baustoffanbieter zur Baustelle im Schumacher Quartier, Berlin. Die in dieser Studie verwendeten Transportwege sind in Tabelle 3 angegeben.

Um absolute Zahlen für das gesamte Schumacher Quartier, Berlin zu erhalten, wurde angenommen, dass 123 Beispielgebäude in das Quartier passen.

2.4 EINGANGSDATEN FÜR BERECHNUNGEN

Für die Berechnungen mit Python wurden zwei Eingangstabellen erstellt. Tabelle 1 und Tabelle 2 führen die Baustoffe für jede Art der Baukonstruktion auf und sind den Gebäudeteilen zugewiesen, in denen sie verwendet werden, unter Angabe ihres Gewichtsanteils an dem Beispielgebäude.

Tabelle 1 enthält die Baustoffe für jede Art der Baukonstruktion mit ihrem CO₂-Koeffizienten, ihrer Biomassefraktion und ihrem Kohlenstoffverhältnis. Die Definitionen für die Biomassefraktion und das Kohlenstoffverhältnis (Kohlenstoff-Biomasse-Verhältnis) sind in Kapitel 2.3 enthalten. Alle Werte wurden hauptsächlich mithilfe der Datenbank Ökobaudat des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB, o. D.) und der Umweltproduktdeklarationen recherchiert, die von der Herstellerin und dem Hersteller für einige der Baustoffe zur Verfügung gestellt wurden.

Wenn keine weiteren Informationen gefunden wurden, wurde angenommen, dass bei biomassebasierten Materialien (zum Beispiel holzbasierten Materialien) die Biomassefraktion 1 und das Kohlenstoffverhältnis 0,5 beträgt und bei anorganischen Materialien die Biomassefraktion und das Kohlenstoffverhältnis 0 betragen.

Der CO₂-Emissionsfaktor beschreibt das gesamte Treibhauspotenzial (GWP) der Baustoffe.

Um Emissionen aus der Produktionsphase zu berücksichtigen, wurde der GWP-Wert der Lebenszyklusphasen A1 bis A3 für jeden Baustoff (Cradle-to-Gate-EPD) verwendet, einschließlich der Rohstoffzufuhr, des Transports zur Produktionsstätte und der Produktion selbst. Da sich der CO₂-Emissionsfaktor auf eine Baustofftonne bezieht, wurde das GWP durch die Bruttodichte bzw. das Gewicht pro Flächeneinheit des Baustoffs geteilt, wenn der Referenzfluss nicht schon einen Massebezug hatte. Wenn verschiedene GWP-Werte aus unterschiedlichen Datenquellen vorlagen, wurde der Durchschnittswert berechnet.

Für einige biomassebasierte Baustoffe, vor allem Baustoffe auf Holzbasis, führte die Einbeziehung der Rohstoffe zu einem negativen GWP-Wert aufgrund der Kohlenstoffbindung beispielsweise von Holz. Da der CO₂-Emissionsfaktor nur die Emissionen abbilden soll, muss die Kohlenstoffbindung aus dem GWP ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck wurde die in den Baustoffen enthaltene Kohlenstoffmasse anhand der Formel

$$m_c = M_i \times B_i \times CW$$

wobei Folgendes gilt:
 m_c = Kohlenstoffmasse [t],
 M_i , B_i , CW – siehe Kapitel 2.3. Beschreibung des numerischen Algorithmus.

Wenn der Kohlenstoff aus den Baustoffen hypothetisch mit CO₂ reagiert, gilt:

$$n_c = n_{CO_2}$$

wobei Folgendes gilt:
 n_c = Stoffmenge von Kohlenstoff [mol]
 n_{CO_2} = Stoffmenge von CO₂ [mol]

Anhand der Stoffmenge wurde die Masse des CO₂ berechnet, das sich aus dem Kohlenstoff in dem Baustoff bilden würde, und zu dem GWP des Baustoffs hinzugefügt, um die Kohlenstoffbindung zu eliminieren und den CO₂-Emissionsfaktor zu bestimmen:

$$n_{CO_2} = m_c / M_c$$

wobei Folgendes gilt:
 M_c = molare Masse von Kohlenstoff [g mol⁻¹],
 entspricht 12 g mol⁻¹

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} \cdot M_{CO_2}$$

dabei gilt Folgendes:
 m_{CO_2} = CO₂-Masse [t],
 M_{CO_2} = molare Masse von CO₂ [g mol⁻¹],
 entspricht 44,01 g mol⁻¹

$$k_i + GWP + m_{CO_2}$$

wobei Folgendes gilt:
 k_i – siehe Kapitel 2.3 Beschreibung des numerischen Algorithmus

GWP = für die verschiedenen Baustoffe recherchierter GWP-Wert [t CO₂ eq. t⁻¹], einschließlich der Kohlenstoffbindung von biomassebasierten Produkten

2.5 HOLZNACHFRAGE

Zur Berechnung der Menge an geerntetem Holz, die für jede Art der Baukonstruktion benötigt wird, wurde der Verlust an Holzmasse in jedem Verarbeitungsschritt berücksichtigt. Die Gesamtmenge an Biomasse kann anhand der Biomassefraktion der Baustoffe in den Eingangsdaten ermittelt werden. Für jede Bauweise gilt:

$$m_B = \sum_i (M_i \cdot B_i)$$

wobei Folgendes gilt:
 M_i , B_i – siehe Kapitel 2.3. Beschreibung des numerischen Algorithmus und
 m_B – Biomasse für jede Bauweise

Um die gesamte Holzmenge vor der Verarbeitung zu ermitteln, muss der Wert für die gesamte Biomasse durch den umgekehrten Prozentanteil für jeden Zwischenschritt der Verarbeitung geteilt werden, beginnend mit Bauabfällen. Für jeden Schritt gilt dabei:

$$m_i = m_B / P_i$$

wobei Folgendes gilt:
 m_i – Material vor dem Verarbeitungsschritt
 P_i – umgekehrter Prozentsatz des Materialverlusts

Die einzelnen Schritte werden unten dargestellt. Da Holzmengen üblicherweise als Volumen berechnet werden, muss das Gewicht des Holzes durch seine Dichte geteilt werden. Für Kiefernholz beträgt die angegebene Dichte 520 kg/m³ (DIN e. V. [Hrsg.], 2003).

Verarbeitungsschritte und auftretende Materialverluste:

| Verarbeitungsschritt | Materialverlust | Quelle |
|------------------------|-----------------------|---|
| Fällen von Bäumen | 20 % | Schätzung unter Berufung auf Berliner Forsten |
| Sägewerk | 15 % | Schätzung unter Berufung auf Binderholz |
| Bauabfälle | 10 % | Eigene Schätzung |
| Dichte von Kiefernholz | 520 kg/m ³ | (DIN e. V. [Hrsg.], 2003) |



2.6 MEINUNGEN VON EXPERTINNEN UND EXPERTEN

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Rechercheansätze verfolgt, um umfassende Einblicke in die Forstwirtschaft und die Holzverarbeitung zu gewinnen. Zusätzlich zu der Analyse existierender Daten und der Berücksichtigung relevanter Literaturquellen wurden Erkenntnisse aus persönlichen Gesprächen mit Expertinnen und Experten gewonnen, die über umfassende Expertise und jahrelange praktische Erfahrung auf diesem Gebiet verfügen. Diese Expertinnen und Experten wurden ausgewählt, um spezifische Fragen im Hinblick

auf Anwendung, Leistungsvermögen und Einschränkungen von Holzbauweisen in der Region Berlin-Brandenburg zu beantworten. Es fand ein direkter persönlicher Austausch in Form von informellen Gesprächen, Expertinnen- und Expertenbefragungen sowie Werksbesuchen statt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dokumentiert und als zusätzliche Informationsquelle für diese Studie genutzt.

Wichtiger Hinweis: Die in diesem Bericht vorgestellten Informationen sind keine offizielle Stellungnahmen, sondern aus dem persönlichen Austausch gewonnene informelle Kommentare der Expertinnen und Experten. Diese Erkenntnisse aus persönlichen Gesprächen dienen als Ergänzung der methodischen Ansätze, mit dem Ziel, ein umfassenderes Verständnis der Möglichkeiten und Herausforderungen in der Forstwirtschaft, der Holzverarbeitung und dem Holzbau aufzubauen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Diskussion und Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt, um die Anwendbarkeit und Relevanz der Studie zu erhöhen.

3

ERGEBNISSE UND DISKUSSION



3.1

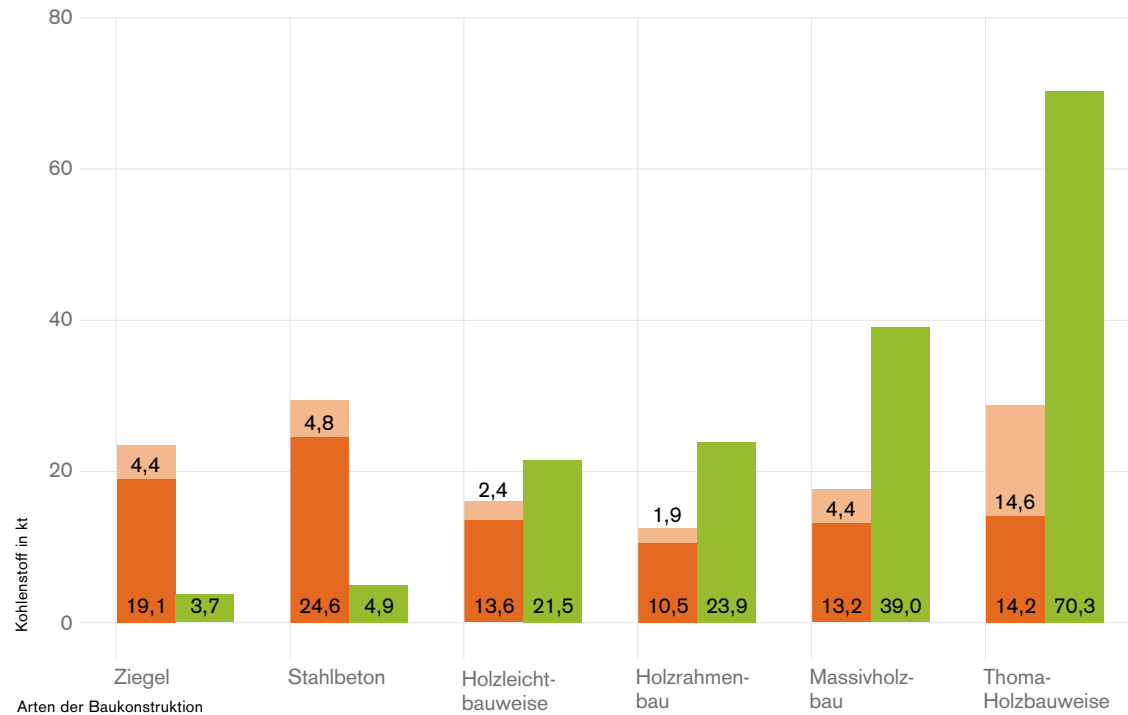
WELCHE ARTEN DER BAUKONSTRUKTION SIND AM KLIMA- FREUNDLICHSTEN?

Zukünftige Wohngebäude und die begleitende Infrastruktur sollten mit so wenig Kohlenstoffemissionen wie möglich gebaut werden (Vallenthin et al., 2010). Je weniger Kohlenstoff bei der Produktion und beim Transport der Baustoffe sowie beim Bau und Betrieb der Gebäude emittiert wird, desto klimafreundlicher sind sie. Außerdem führt ein höheres Kohlenstoffbindungspotenzial eines Baustoffs zu klimafreundlicheren Auswirkungen des entsprechenden Gebäudes. Die klimafreundlichste Art der Baukonstruktion ist gemäß diesem Bericht deshalb als die Konstruktion definiert, die die höchste Kohlenstoffbindung pro ausgestoßenem Kohlenstoff aus der Produktion ermöglicht. Bei der Berechnung dieses Verhältnisses wurden Emissionen in Zusammenhang mit dem Transport ausgeschlossen, weil sie sehr unsicher sind und von der jeweiligen Bauart und dem Bauträger sehr einfach durch die Wahl der Anbieterin und des Anbieters modifiziert werden können.

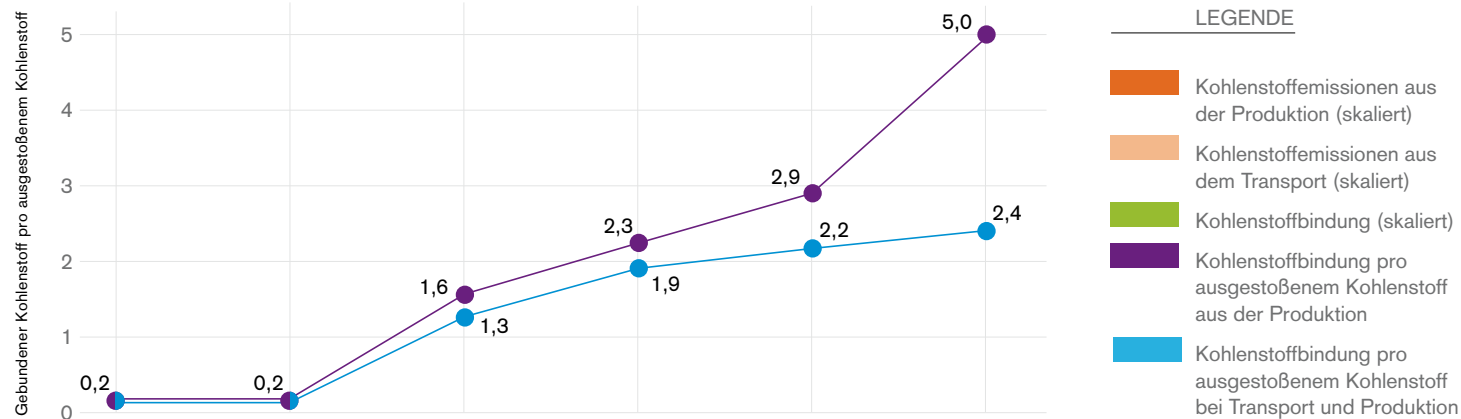
Abbildung 28 zeigt, dass die mineralbasierten Arten der Baukonstruktion die höchsten Kohlenstoffemissionen aus der Produktion aufweisen, mit dem höchsten Wert (24,6 kt) für Stahlbeton, gefolgt von der Ziegelbauweise (19,1 kt). Die Produktionsemissionen der biomassebasierten Bauweisen haben die folgende Rangfolge: Thoma-Holz (14,2 kt), Holzleichtbauweise (13,6 kt) und Massivholzbau (13,2 kt). Der Holzrahmenbau hat die geringsten Produktionsemissionen (10,5 kt).

Die mineralbasierten Arten der Baukonstruktion haben das geringste Bindungspotenzial. Die Ziegelbauweise enthält rund 2 % organische Materialien, während die Stahlbetonbauweise weniger als 1 % organische Materialien enthält. 39 % des Gewichts von Konstruktionen in Holzleichtbauweise entfallen auf organische Materialien, während es bei der Holzrahmenbauweise 37 % sind. In diesen organischen Anteilen werden 23,9 kt (Holzrahmenbau) und 21,5 kt (Holzleichtbauweise) Kohlenstoff gebunden. Das höchste Kohlenstoffbindungspotenzial ist bei Massivholzbauweisen ersichtlich, die auch die höchsten Anteile an organischen Baustoffen haben (58 % bei Thoma-Holz und 43 % bei Massivholzbau). Die Thoma-Holzbauweise bindet 70,3 kt Kohlenstoff, während der Massivholzbau 39 kt bindet.

Die Kohlenstoffbindung pro ausgestoßenem Kohlenstoff bei Transport und Produktion wird von den Verhältniskurven im unteren Teil von Abbildung 28 dargestellt. Das Verhältnis ist für die Ziegelbauweise und Stahlbeton mit 0,2 t gebundenem Kohlenstoff pro Tonne ausgestoßenem Kohlenstoff am geringsten (Abbildung 28). Der Anteil ist bei holzbasierten



→ **Abbildung 28**
Kohlenstoffemissionen aus der Produktion von Baustoffen (A1–A3), dem Transport von Baustoffen von der Produktionsstätte zur Baustelle (A4) und der Kohlenstoffbindung der Materialien nach Art der Baukonstruktion, skaliert für alle 123 Gebäude des Schumacher Quartiers. Rechts: Verhältnis zwischen der Kohlenstoffbindung und den Kohlenstoffemissionen aus der Produktion und dem Transport für alle Arten der Baukonstruktion. Werte aus Tabelle 3.



LEGENDE
 ■ Kohlenstoffemissionen aus der Produktion (skaliert)
 ■ Kohlenstoffemissionen aus dem Transport (skaliert)
 ■ Kohlenstoffbindung (skaliert)
 ■ Kohlenstoffbindung pro ausgestoßenem Kohlenstoff aus der Produktion
 ■ Kohlenstoffbindung pro ausgestoßenem Kohlenstoff bei Transport und Produktion

Bauwerken deutlich höher. Pro Tonne an ausgestoßenem Kohlenstoff werden 1,3 t bei der Leichtholzbauweise und 1,9 t bei der Holzrahmenbauweise gebunden. Die Massivholzbauweise bindet 2,2 t Kohlenstoff pro Tonne an ausgestoßenem Kohlenstoff – nur 0,2 t weniger als Thoma-Holz. Thoma-Holz bindet 2,4 t Kohlenstoff pro Tonne an ausgestoßenem Kohlenstoff, was zu dem besten Verhältnis zwischen Kohlenstoffbindung und Kohlenstoffemissionen für den Transport und die Produktion führt.

Die Ergebnisse zeigen, dass holzbasierte Bauweisen klimafreundlicher sind als mineralbasierte Bauweisen. Das liegt nicht nur daran, dass die Produktionsemissionen der mineralbasierten Bauweisen viel höher sind, sondern auch an der Tatsache, dass ihr Kohlenstoffbindungspotenzial etwa 4- bis 19-mal niedriger ist als bei Bauweisen mit einem höheren Anteil an organischen Materialien.

Die höheren Verhältniswerte der holzbasierten Bauweisen in Bezug zum Bindungspotenzial lassen sich folgendermaßen erklären: Je schwerer der Anteil an organischen Baustoffen ist, desto höher ist das Kohlenstoffbindungs-

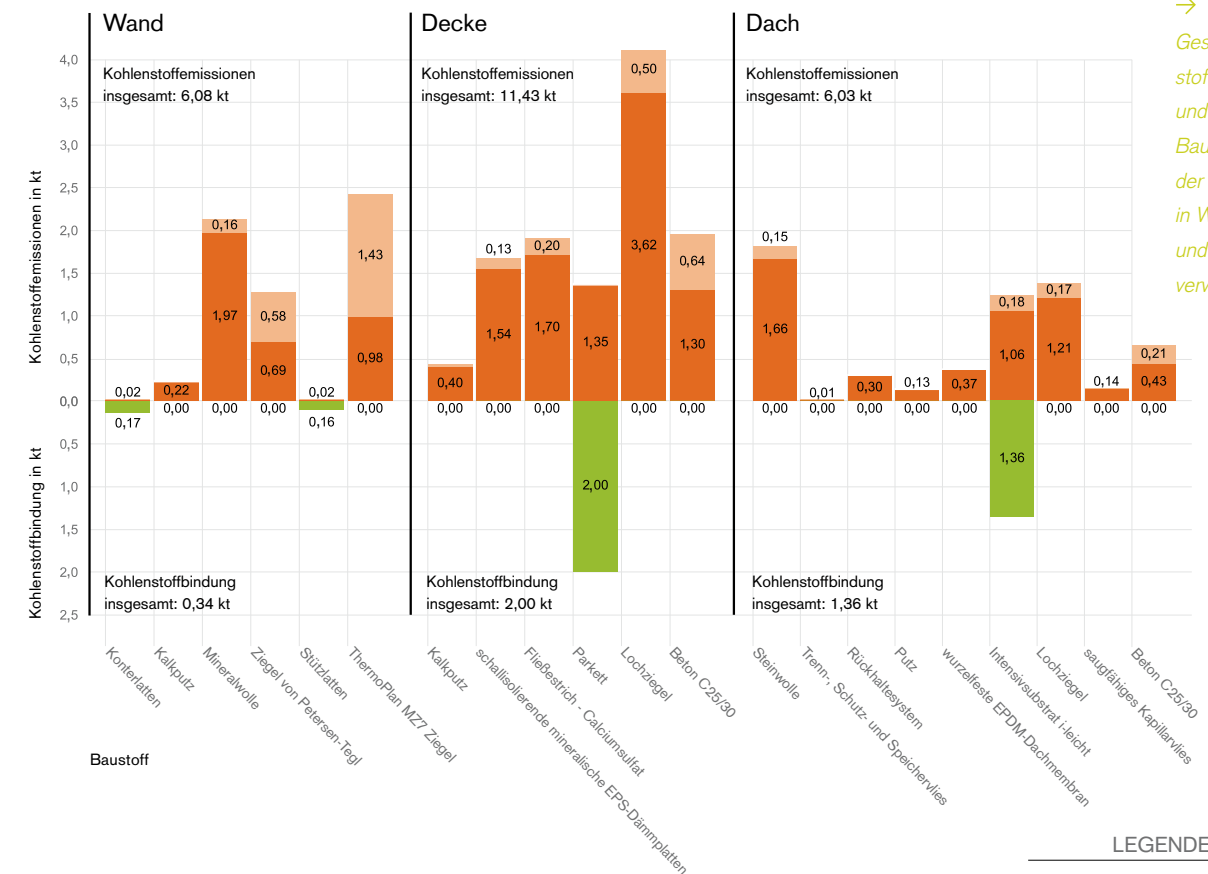
potenzial. Die Thoma-Holzbauweise ist die schwerste der holzbasierten Bauweisen, mit einem Gewicht von 1.808,2 t für ein Gebäude. Daher hat diese Bauweise bei Weitem das höchste Kohlenstoffbindungspotenzial (70,3 kt). Das ist beinahe doppelt so hoch wie das Potenzial der Bauweise mit dem zweithöchsten Kohlenstoffbindungspotenzial: der Massivholzbau (39 kt), der die klimafreundlichste Bauweise zu sein scheint. Dies wird noch besser ersichtlich, wenn man das Verhältnis von Thoma-Holz ohne Transportemissionen betrachtet (Abbildung 28, rechte Seite, violette Linie). Dieses ist eindeutig höher als das Verhältnis einschließlich Transportemissionen (Abbildung 28, rechte Seite, hellblaue Linie), und zwar aufgrund der langen Transportwege der Thoma-Produkte. Wenn man diese Transportwege ausschließt, ist die Kohlenstoffbindung pro ausgestoßener Tonne Kohlenstoff in der Produktion für Thoma-Holz mit 5 t fast doppelt so hoch wie das Verhältnis für Massivholzbau (2,9 t). In diesem Fall weisen die Daten darauf hin, dass Thoma Holz100 die klimafreundlichste Bauweise ist.

3.2 WELCHE BAUSTOFFE UND GEBÄUDETEILE LEISTEN DEN GRÖSSTEN BEITRAG BEI ...

... MINERALBASIERTEN BAUWEISEN?

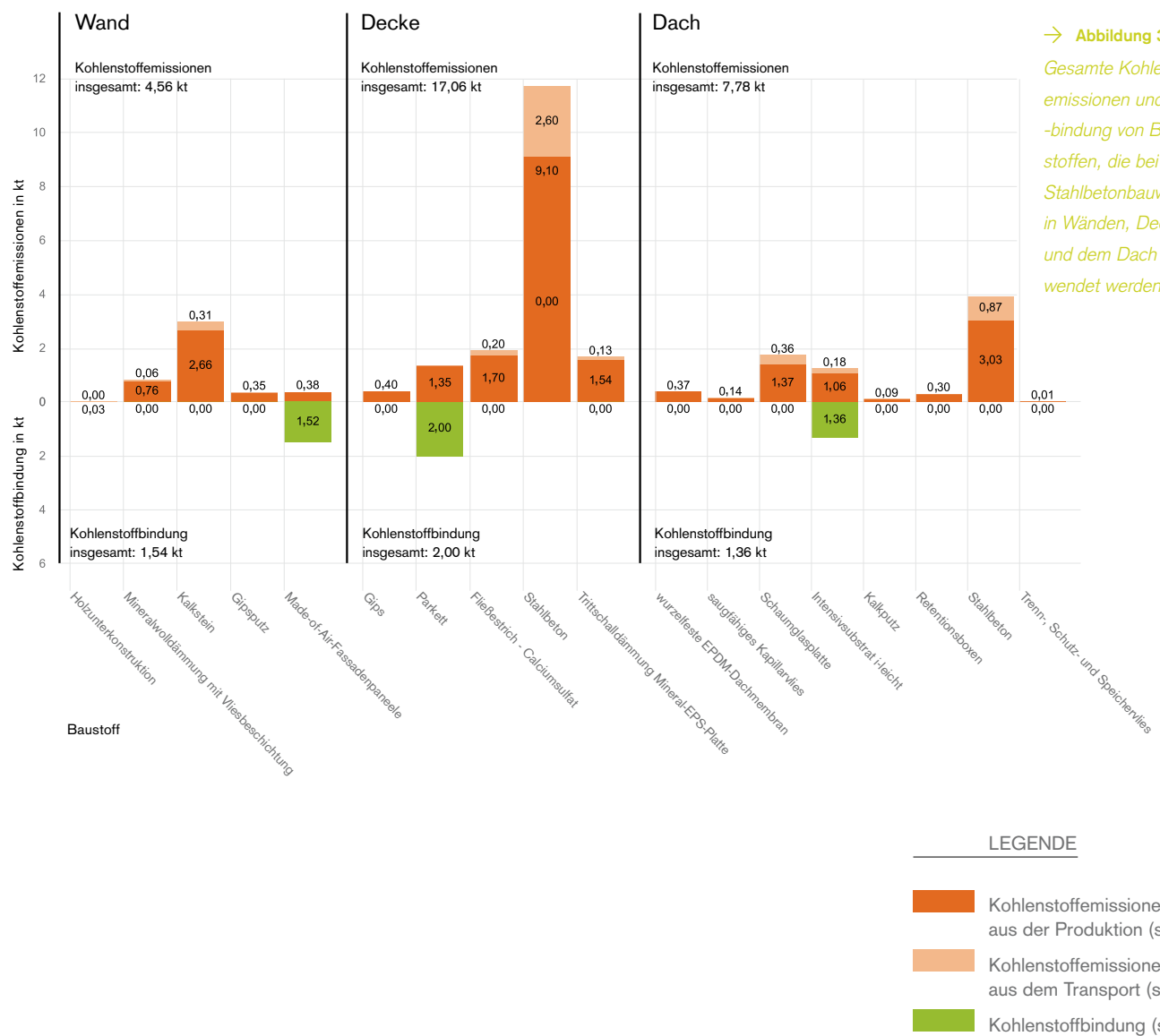
Ziegel und Stahlbeton sind mineralische Baustoffe mit erheblichen Auswirkungen auf die Kohlenstoffemissionen. Ein nennenswertes Kohlenstoffbindungspotenzial ergibt sich lediglich für Parkett und das Substrat für das begrünte Dach (Intensivsubstrat i-leicht) (Abbildung 29 und Abbildung 30).

Für die „Ziegelbauweise“ wird ersichtlich, dass die Summe der Kohlenstoffemissionen für alle Gebäudeteile weit über das Bindungspotenzial hinausgeht. Ziegelbaustoffe (vor allem Lochziegel sowie ThermoPlan MZ7 Ziegel) leisten den größten Beitrag zu den Kohlenstoffemissionen der gesamten Bauweise. Andere mineralische Baustoffe mit hohem Energieverbrauch während der Produktion, wie Mineralwolle und Beton C25/30, erhöhen ebenfalls die Kohlenstoffemissionen. Im Gegensatz dazu werden nennenswerte Mengen an Kohlenstoff von nur zwei organischen Baustoffen gebunden: Parkett und Intensivsubstrat i-leicht.

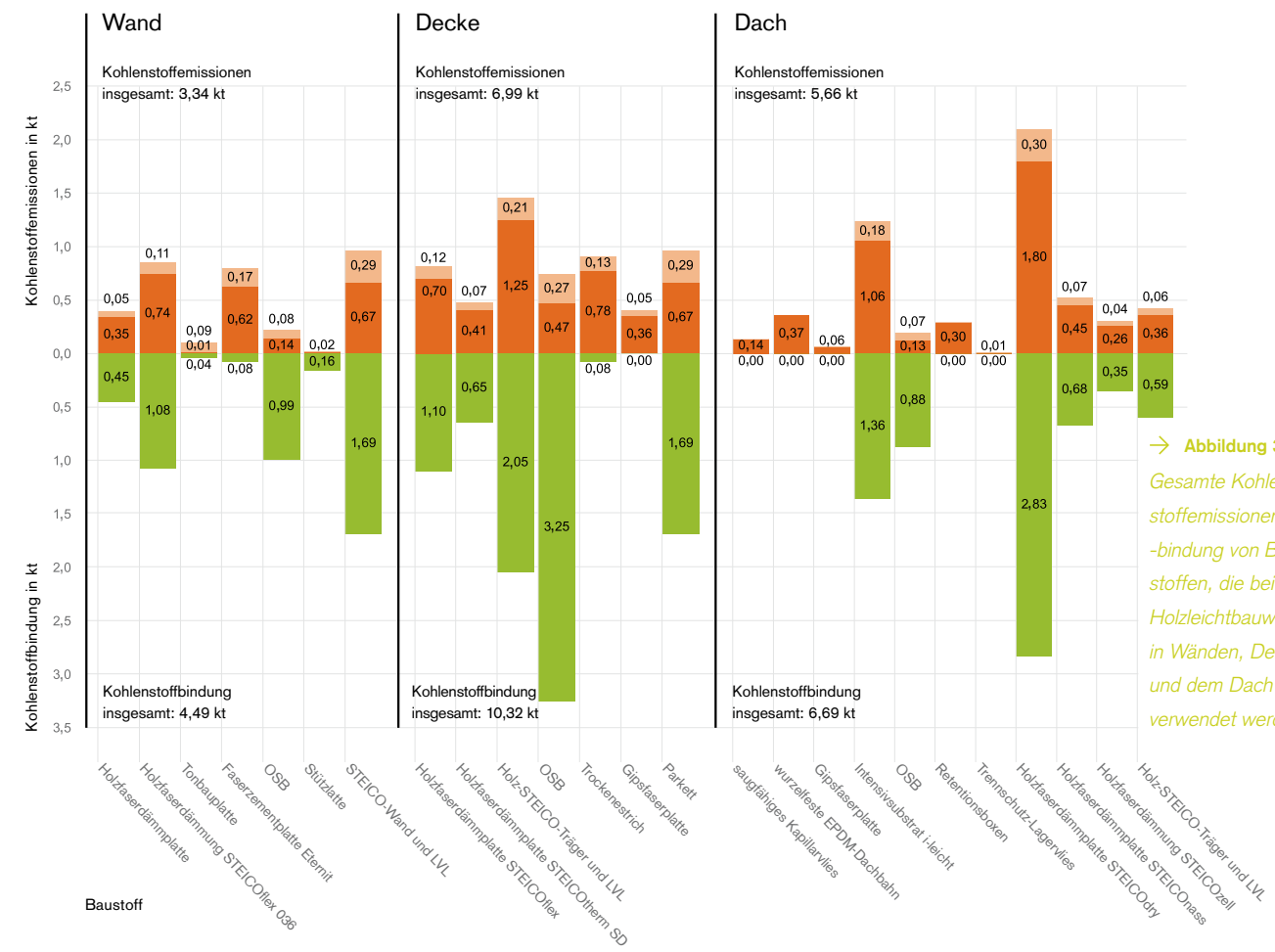


→ **Abbildung 29**
Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Ziegelbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden

LEGENDE
 ■ Kohlenstoffemissionen aus der Produktion (skaliert)
 ■ Kohlenstoffemissionen aus dem Transport (skaliert)
 ■ Kohlenstoffbindung (skaliert)



→ **Abbildung 30**
Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Stahlbetonbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden



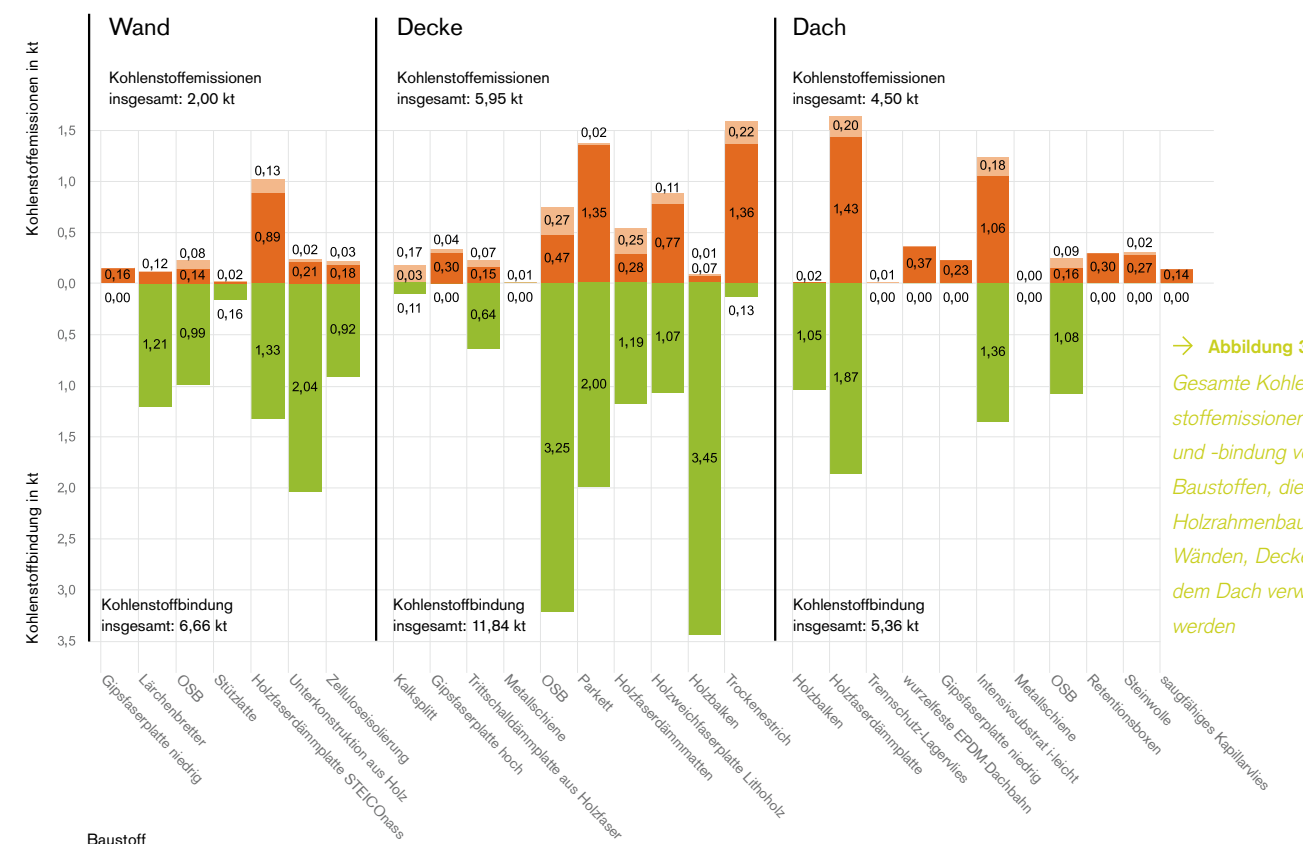
→ **Abbildung 31**
Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Holzleichtbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden

... HOLZRAHMEN-LEICHTBAUWEISEN?

Die Ergebnisse der Berechnungen der Kohlenstoffemissionen und Kohlenstoffbindung für die Holzleichtbauweise und den Holzrahmenbau zeigen ein ganz anderes Bild (Abbildung 31 und Abbildung 32). Die Unterschiede bei den Emissionen und dem Bindungspotenzial der verschiedenen Baustoffe sind deutlich ausgeprägter, weshalb die Auswertung komplexer erscheint. Obwohl viele dieser Baustoffe ein hohes Kohlenstoffbindungspotenzial haben, wird dieses von ihren hohen Kohlenstoffemissionen beinahe vollständig ausgeglichen. Dies gilt zum Beispiel für Holzfaserdämmplatten STEICODry, STEICOjoist plus Ebenen und Holzfaserdämmplatten STEICOflex 036 (Abbildung 31). Die relativ hohen Emissionen in diesen Fällen sind vermutlich auf die auftretenden Transportemissionen zurückzuführen. Dies müsste jedoch eingehender untersucht werden. Hohe Kohlenstoffemissionen für einzelne Baustoffe

können daher möglicherweise auf großen Entfernungen zu der Anbieterin und dem Anbieter beruhen. Insgesamt ist jedoch wahrscheinlich die große Anzahl der Baustoffe dafür verantwortlich, die zu hohen Transportkosten führt. Der Vorteil des geringen Gewichts der beiden Bauweisen muss jedoch ebenfalls berücksichtigt werden. Dies hat wahrscheinlich vergleichsweise positive Auswirkungen auf die Transportemissionen.

Für den Holzrahmenbau sollte das hohe Kohlenstoffbindungspotenzial der Holzträger, Grobspanplatten und Holzunterkonstruktion hervorgehoben werden. Die positiven Auswirkungen von Baustoffen mit hohem Bindungspotenzial auf das Kohlenstoffverhältnis werden bei der Holzleichtbauweise weniger stark durch die Emissionen gedämpft (Abbildung 32). Dies führt zu einem höheren Verhältnis von gebundenem Kohlenstoff pro ausgestoßenem Kohlenstoff für den Holzrahmenbau, was in Abbildung 28 dargestellt ist.

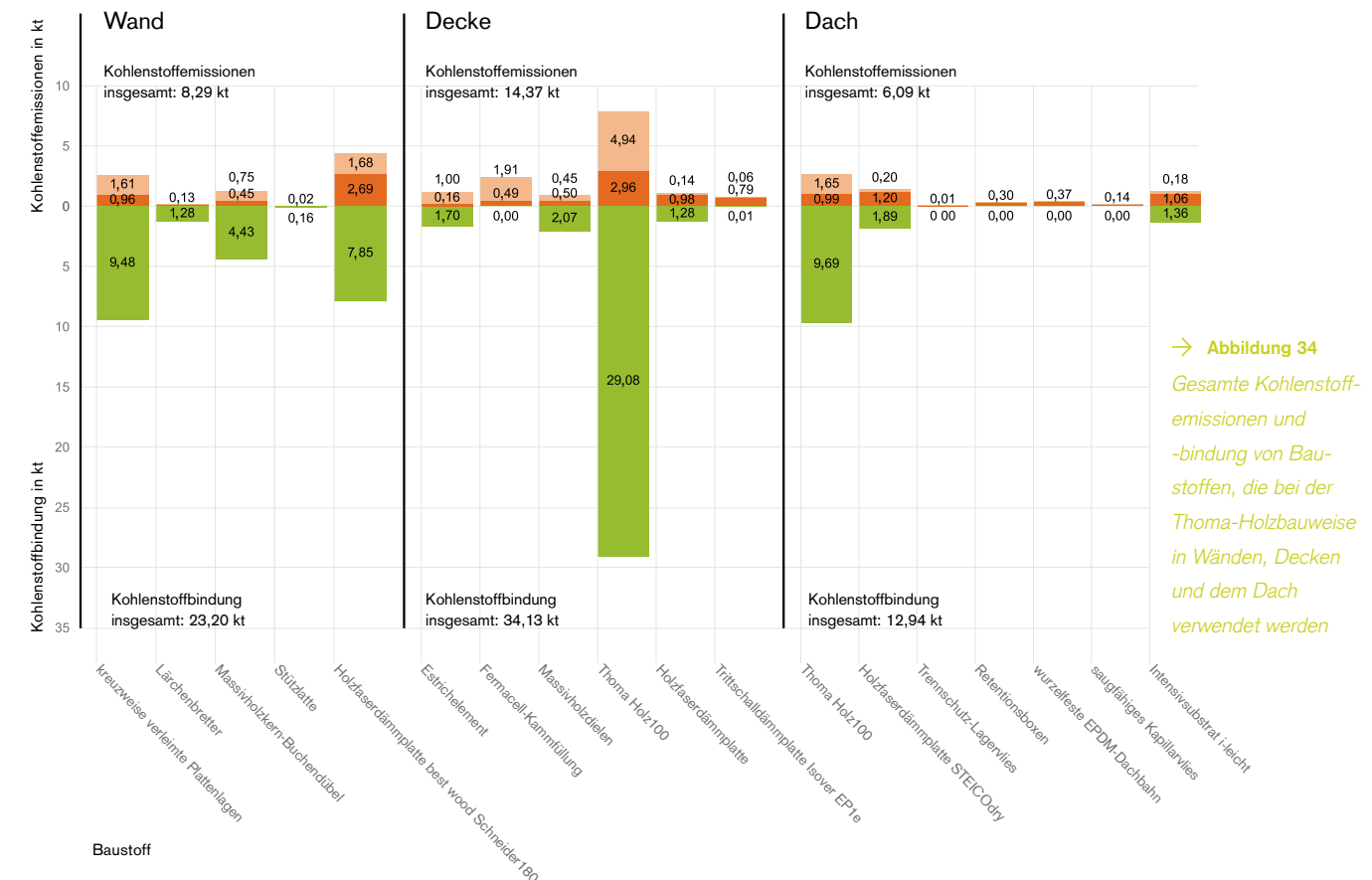
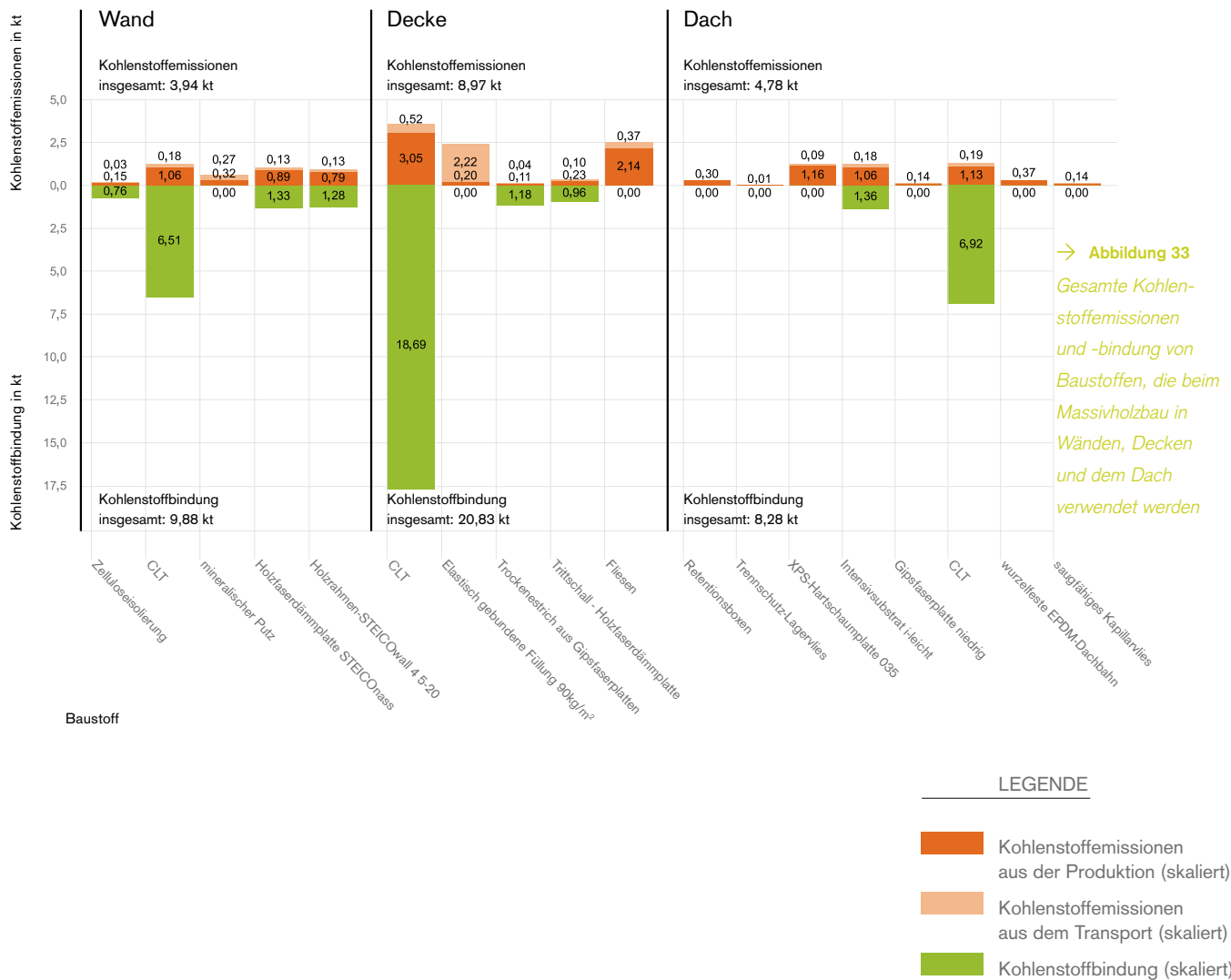


→ **Abbildung 32**
Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die beim Holzrahmenbau in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden

... MASSIVHOLZBAUWEISEN?

Bei der Beurteilung des Massivholzbbaus zeigen die Ergebnisse wieder ein anderes Muster. Obwohl die Kohlenstoffemissionen generell mit denen der Holzleichtbauweisen vergleichbar sind, verändern die herausragenden Werte von CLT für die Kohlenstoffbindung das Gesamtbild (Abbildung 33). Daher ist das Bindungspotenzial weitaus höher als die Emissionen. Wenn die Deckenplatten mit hohem Kohlenstoffausstoß ersetzt werden, wären weitere Verringerungen der Emissionen möglich, was das Gesamtverhältnis zwischen gebundenem Kohlenstoff und ausgestoßenem Kohlenstoff verbessern würde.

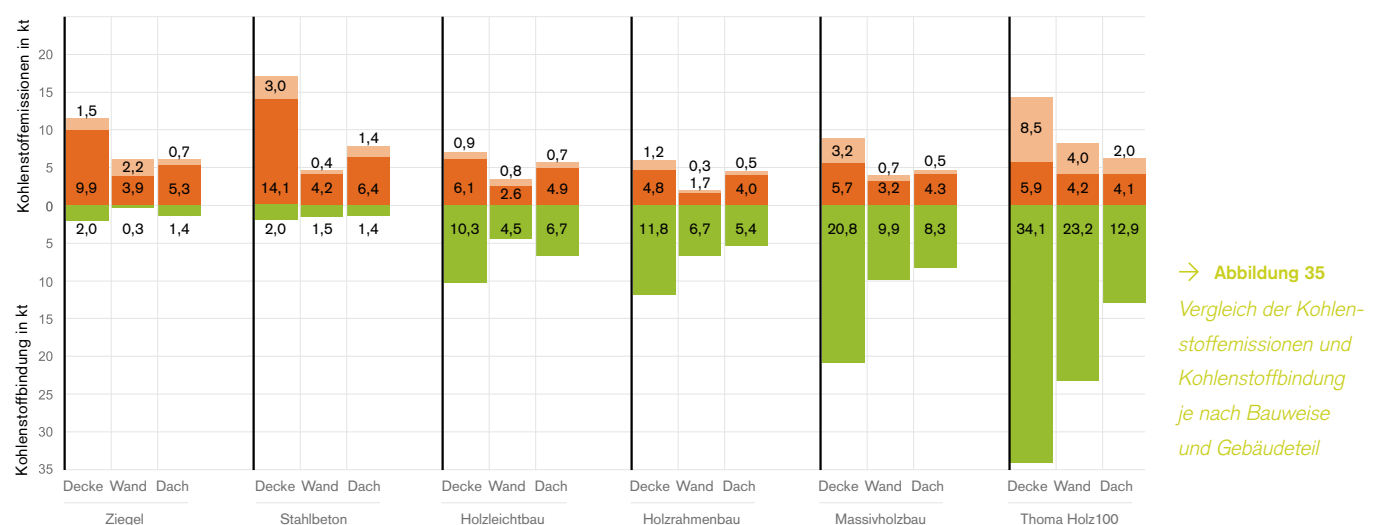
Thoma Holz100 hat von allen Bauweisen den größten Gewichtsanteil an organischen Materialien. Die Kohlenstoffemissionen und Kohlenstoffbindung sind für die Baustoffe Thoma Holz100, Holzfaserdämmplatten best wood Schneider 180 und kreuzweise verklebte Plattenlagen am höchsten (Abbildung 34). Im Vergleich zu allen anderen Materialien ist das Kohlenstoffbindungspotenzial besonders hoch. Es liegt wahrscheinlich an den langen Transportwegen des Materials von Österreich bis nach Berlin, dass seine Kohlenstoffemissionen die positiven Auswirkungen seines Kohlenstoffbindungspotenzials teilweise aufwiegen.



3.2.1 ZUSAMMENFASSENDE ANMERKUNGEN

Die größten Anteile an den Emissionen von mineralbasierten Bauweisen sind auf die Primärstruktur zurückzuführen. Für die Ziegelbauweise gilt dies für verschiedene

Ziegelarten und Beton und für die Stahlbetonbauweise ist es auf Stahlbeton und Kalkstein anwendbar. Bei den beiden Holzrahmen-Leichtbauweisen sind die Kohlenstoffemissionen aufgrund des breiteren Materialmixes gleichmäßiger auf die Baustoffe verteilt.



Für Massivholzbauweisen verbessert sich das Verhältnis von gebundenem Kohlenstoff zu ausgestoßenem Kohlenstoff aufgrund der hohen Anteile an organischen Materialien mit einem hohen Kohlenstoffbindungspotenzial. Im Allgemeinen unterstreichen die Ergebnisse die Tatsache, dass das Kohlenstoffbindungspotenzial einer Bauweise umso höher ist, je schwerer der Anteil an organischen Baustoffen ist.

Im Hinblick auf den Beitrag der Gebäudeteile haben Rohdecken den höchsten Anteil an Kohlenstoffemissionen und -bindung (Abbildung 35), was wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass die Rohdecken die größte Fläche in dem geplanten vierstöckigen Gebäude ausmachen.

Um den Beitrag verschiedener Baustoffe zu den Kohlenstoffemissionen zu bewerten, muss der Energiebedarf für ihre Produktion ebenfalls berücksichtigt werden. Baustoffe, deren Fertigung energieintensiv ist (zum Beispiel Beton und Stahl), erhöhen die Gesamtkohlenstoffemissionen, und zwar vor allem dann, wenn sie in großen Mengen eingesetzt werden, zum Beispiel in den Primärstrukturen des Gebäudes. In diesen Fällen könnten die Kohlenstoffemissionen möglicherweise reduziert werden, indem energieintensive Mineralien durch organische Baulösungen ersetzt werden oder, falls möglich, ein Umstieg auf erneuerbare Energiequellen im Produktionsprozess erfolgt.

Organische Materialien mit hoher Kohlenstoffbindung können somit potenziell zur Vergrößerung des urbanen Kohlenstoffbestands beitragen. Dies verspricht positive Auswirkungen auf den Kohlenstoffzyklus, da es die Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre verhindert (oder zumindest verzögert) und so dem Klimawandel entgegenwirkt. Interessant ist dies vor allem für mehrstöckige Gebäude, die durch den Einsatz von mehr holzbasierten Baustoffen ihre pro Person zur Verfügung stehende Fläche effizienter nutzen, eine weitere Flächenversiegelung verhindern und die Bindung höherer Kohlenstoffvolumen ermöglichen (Churkina et al., 2020; Pittau et al., 2022). Außerdem leisten Baustoffe mit einer längeren Lebensdauer, vor allem dann, wenn sie wiederverwendbar oder recycelbar sind, einen positiven Beitrag zur städtischen Kohlenstoffsänke – dies wird auch als Kaskadennutzung holzbasierter Baustoffe bezeichnet (Budzinski et al., 2020). Das gilt insbesondere für den Massivholzbau und die Thoma-Holzbauweise, da deren Gebäudeteile in ihrer Zusammensetzung weniger komplex sind und sich besser für das Recycling eignen, weil sie weniger Verbundmaterialien enthalten (Dangel, 2017).

3.3 IST DER EINSATZ VON REGIONALEM HOLZ UND ANDEREN REGIONALEN ROHSTOFFEN AM KLIMAFREUNDLICHSTEN?

Wenn mehr regionale Baustoffe gewählt werden, entstehen kürzere Transportwege und damit auch weniger Transportemissionen. Für das Schumacher Quartier wurde der Begriff „regional“ als innerhalb der Grenzen der Bundesländer Berlin und Brandenburg definiert.

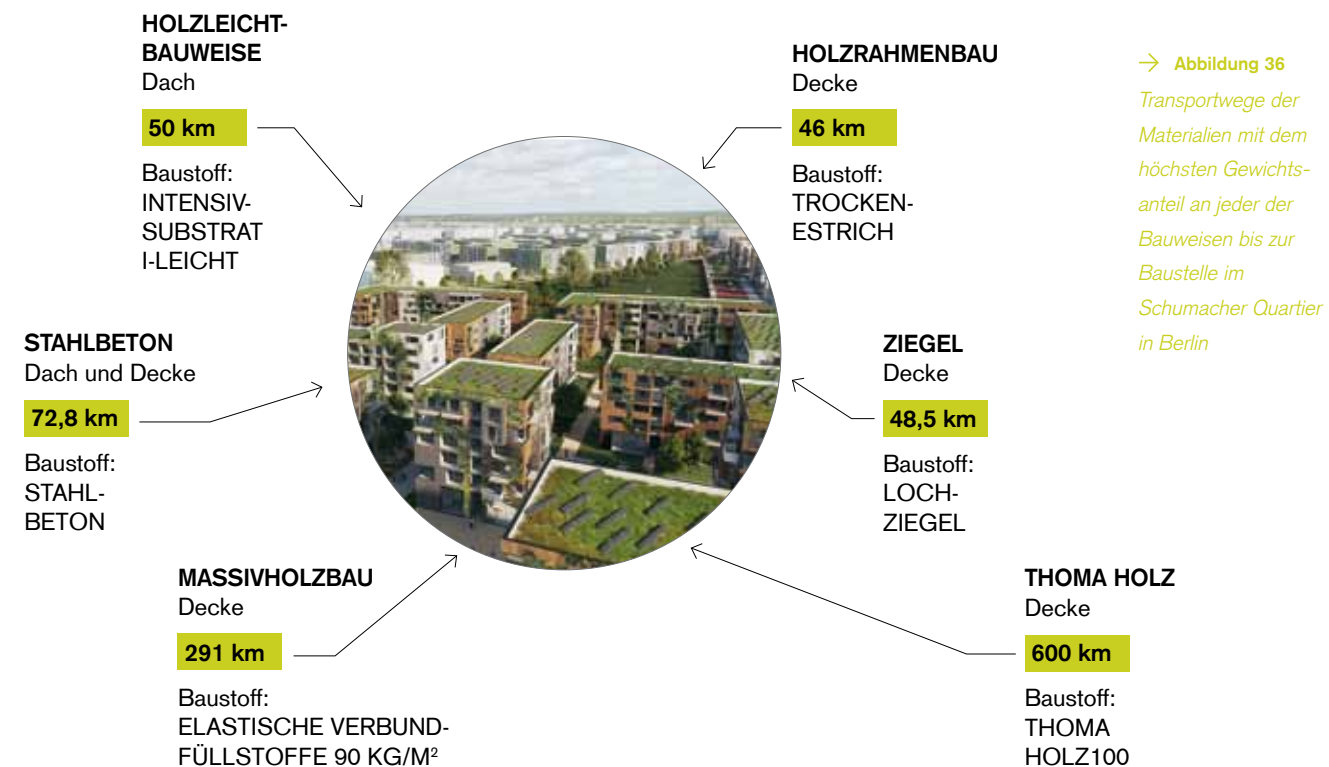
Die Recherche zu möglichen Materiallieferantinnen und -lieferanten hat Unterschiede in der Verteilung von Herstellern verschiedener Materialgruppen in Deutschland und den Nachbarländern gezeigt. Die Transportwege sind sehr unterschiedlich, von häufig eingesetzten Materialien wie Beton, bei denen es einfach ist, lokale Anbieterinnen und Anbieter zu finden, bis hin zu stark spezialisierten Anbieterinnen und Anbietern, die lange Transportwege bis nach Berlin auf sich nehmen müssen, wie zum Beispiel bei den Produkten der Thoma Holz GmbH (Tabelle 1 in den Anhängen). Außerdem sind das Gewicht, der Anteil und die Menge der Baustoffe für verschiedene Bauweisen unterschiedlich. Dementsprechend müssen verschiedene Verhältnisse zwischen Kohlenstoffemissionen und Transportwegen berücksichtigt werden.

Abbildung 28 (oberes Diagramm) zeigt die bei der Produktion von Baustoffen (A1–A3) erzeugten Emissionen im Vergleich zu den Transportemissionen von Baustoffen von der Produktionsstätte zur Baustelle (A4). Thoma-Holz hat mit 14,6 kt die höchsten Transportemissionen, vor allem aufgrund langer Transportwege, da das Holz nur von wenigen Standorten in der Nähe des Unternehmens Thoma Holz GmbH in Österreich bezogen werden kann. Außerdem sind die Transportemissionen fast zweimal so hoch wie die Produktionsemissionen, was zu negativen Auswirkungen auf die Bewertung dieser Bauweise führt. Die Transportwege der Baustoffe für den Massivholzbau sind vergleichsweise kurz, weshalb die Transportemissionen in Höhe von 4,4 kt etwa 3,3-mal geringer sind als für Thoma Holz. Die Holzrahmen-Leichtbauweisen Holzleichtbauweise und Holzrahmenbauweise verfügen mit jeweils 2,4 kt und 1,9 kt über die niedrigsten Transportemissionen. Die Transportemissionen für mineralbasierte Bauweisen belaufen sich auf 4,4 kt für die Ziegelbauweise und

4,8 kt für die Stahlbetonbauweise. Obwohl die beiden Bauweisen die kürzesten Transportwege für ihre Baustoffe haben, weisen ihre Komponenten wie Lochziegel, Stahlbeton und Kalkstein vergleichsweise hohe Gewichte und Anteile auf, was die Emissionen in die Höhe treibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass längere Transportwege zu höheren Emissionen führen und die Klimaauswirkungen

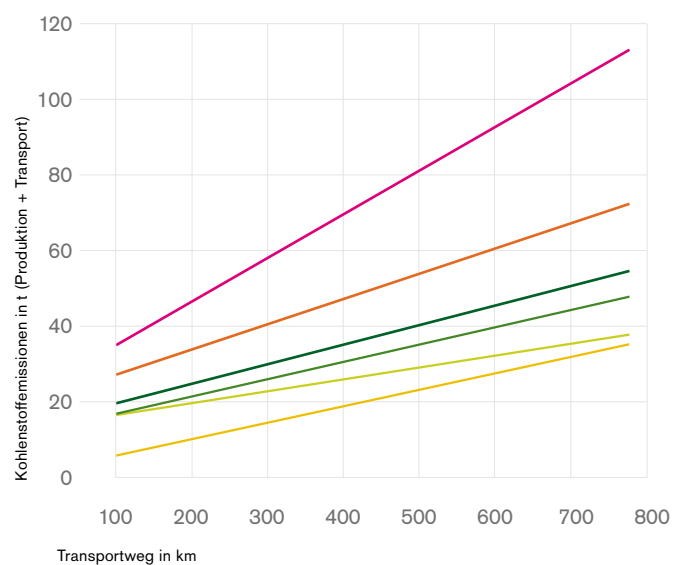
die Bedeutung einer potenziell regionalen Beschaffung für die Bauweisen mit schweren Materialien aufzeigen. In Anbetracht der Kohlenstoffemissionen aus der Produktion hat jede Bauweise andere Ausgangswerte. Ausgehend von dem Achsschnittpunkt (der einer theoretischen Produktionsstätte innerhalb der Baustelle entspricht) erhöhen sich die Emissionen mit zunehmender Entfernung.



einer Bauweise beeinflussen, wie am Beispiel von Thoma-Holz ersichtlich. Noch wichtiger als die Entfernung ist jedoch das Gewicht des transportierten Materials. Abbildung 36 zeigt die Transportwege der Materialien mit dem höchsten Gewichtsanteil für jede der Bauweisen. Daraus wird ersichtlich, dass die schwersten Bestandteile der mineralbasierten Bauweisen innerhalb eines Umkreises von 80 km beschafft werden können (Lochziegel innerhalb von 48,5 km für die Ziegelbauweise; Stahlbeton innerhalb von 72,8 km für die Stahlbetonbauweise), während die Hauptkomponenten für die Massivholzbauweisen bei speziellen Anbieterinnen und Anbietern eingekauft werden müssen und daher längere Transportwege aufweisen (elastische Verbundfüllstoffe innerhalb von 291 km für den Massivholzbau; Thoma Holz100 innerhalb von 600 km für die Thoma-Holzbauweise).

Abbildung 37 zeigt das Verhältnis der Kohlenstoffemissionen bei wachsenden Transportwegen für jede Bauweise. Diese Hochrechnung stellt nicht die berechneten Werte für die Kohlenstoffemissionen dar, sondern soll

Zur Veranschaulichung wurden 100-km-Abstände markiert. Die unterschiedliche Steigung für die verschiedenen Bauweisen ist entscheidend: Es ist klar erkennbar, dass Stahlbeton aufgrund seines hohen Gewichts das höchste Verhältnis von Kohlenstoffemissionen zu Transportwegen hat. Mineralbasierte Bauweisen sind schwerer als holzbasierte Bauweisen, mit einem Gesamtmaterialgewicht von 4,1 kt für Stahlbeton und 2,5 kt für Ziegel, was zu deutlich höheren Transportemissionen führt. Im Gegensatz dazu hat die Holzleichtbauweise die niedrigste Steigung in Bezug auf die Kohlenstoffemissionen pro zusätzlichem Kilometer, gefolgt vom Holzrahmenbau. Dies lässt sich durch das geringe Materialgewicht pro Gebäude erklären: 1 kt für die Holzleichtbauweise und 1,1 kt für den Holzrahmenbau. Die Massivholzbauweisen haben ein höheres Verhältnis von Kohlenstoffemissionen zu Transportwegen als die Holzrahmen-Leichtbauweisen, da ihre Materialien schwerer sind. Mit einem Gesamtgewicht von 1,8 kt ist Thoma-Holz schwerer als Massivholz mit einem Gesamtgewicht von 1,5 kt, was



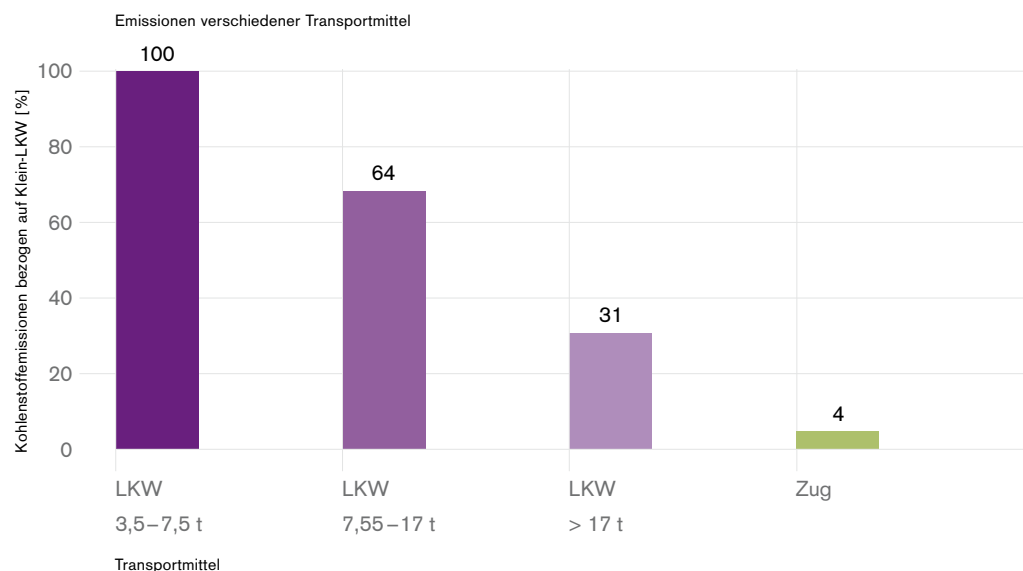
→ **Abbildung 37**
Vergleich des Anstiegs der Kohlenstoff-Emissionsverhältnisse in Bezug auf die Transportwege für jede Bauweise. Achsen-schnittpunkt: Produktionsstätte innerhalb der Baustelle.

zu einer höheren Steigung führt, vor allem im Vergleich mit der Holzleichtbauweise. Das Diagramm zeigt außerdem, dass für die gleiche Entfernung von der Produktionsstätte die Materialverwendung für Thoma-Holz weniger Emissionen produzieren würde als die Verwendung von Material für mineralbasierte Arten der Baukonstruktion. Daher könnten Maßnahmen wie die Einrichtung einer regionalen Produktionsstätte für Thoma-Holz in Berlin-Brandenburg die Transportemissionen erheblich reduzieren und das Verhältnis zu den Produktionsemissionen verbessern.

Um die Frage zu beantworten, ob die Verwendung von regionalem Holz und regionalen Rohstoffen am klimafreundlichsten ist, müssen daher die Art, die Menge und das Gewicht der für eine bestimmte Bauweise verwendeten Baustoffe berücksichtigt werden. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine regionale Produktion weniger entscheidend ist, je leichter das Material ist. Für schwerere Baustoffe gewinnt die Verwendung von regionalem Holz und anderen Rohstoffen an Bedeutung, da die Transport-

emissionen deutlich höher sind. Dennoch kann geschlossen werden, dass ein Baustoff umso klimafreundlicher ist, je näher die Produktionsstätte ist, weil kurze Transportwege zu geringeren relativen Transportemissionen führen.

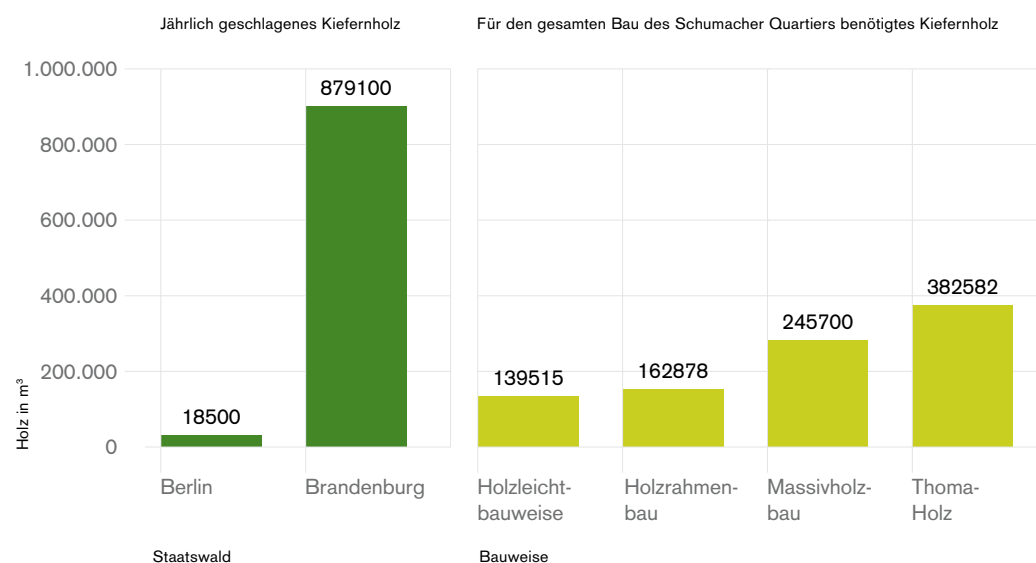
Ein weiterer Faktor, den es zu berücksichtigen gilt, ist die Art des Transports. Die Transportemissionen aus Abbildung 28 sind eine konservative Schätzung, da die Berechnung auf dem Transport in Klein-LKW (3,5–7,5 t) basiert. Andere Transportmittel, wie in Abbildung 38 gezeigt, könnten die Transportemissionen reduzieren und daher klimafreundlicher sein. Verglichen mit dem Transport mit Klein-LKW reduziert die Nutzung von Standard-LKW (7,5–17 t) die Emissionen um 36 % und die Nutzung großer LKW (>17 t) senkt die Emissionen um 69 % (De Wolf et al., 2017). Der Schienentransport, der Emissionen um 96 % reduziert, wäre eindeutig die klimafreundlichste Option (ebd.). Das wäre zum Beispiel bei einer Anbieterin und einem Anbieter für Baustoffe für den Massivholzbau möglich, dessen Werk Schienenanschluss hat.



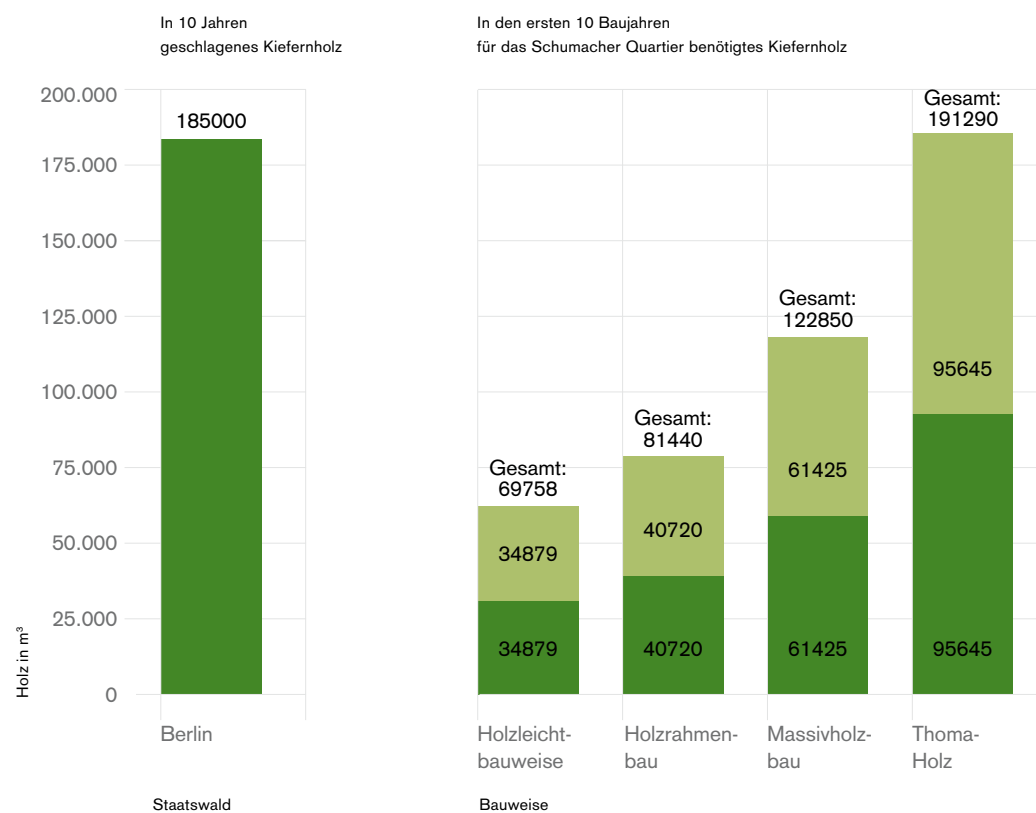
→ **Abbildung 38**
Vergleich der Kohlenstoffemissionen verschiedener Transportmittel. Die Spalten zeigen Emissionen von verschiedenen Transportmitteln im Verhältnis zu den Emissionen von in der Analyse verwendeten Klein-LKW.

3.4 BERECHNUNG DER BENÖTIGTEN HOLZMENGEN

Um zu bewerten, ob die Ernteraten in Berlin und Brandenburg die Mengen bereitstellen könnten, die für den Bau des Schumacher Quartiers mit einer holzbasierten Art der Baukonstruktion benötigt würden, wurde die erforderliche Holzmenge berechnet. Da Kiefern 70 % der bewaldeten Flächen ausmachen (Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes



→ **Abbildung 39**
Benötigte Mengen an geschlagenem Holz für das Schumacher Quartier (Balken in Hellgrün) und jährlich verfügbares geschlagenes Holz in den Staatswäldern von Berlin und Brandenburg für 2021 (Balken in Dunkelgrün)



→ **Abbildung 40**
Benötigte Mengen an geschlagenem Holz für die ersten 10 Baujahre im Schumacher Quartier und verfügbares geschlagenes Kiefernholz über einen Zeitraum von 10 Jahren

LEGENDE

- Holz aus Berliner Forsten
- keine regionalen Vorgaben

Brandenburg, 2015), bevorzugt die Tegel Projekt GmbH Kiefernholz als vorherrschende Holzart für den Bau. Die benötigten Holz mengen wurden mit den Mengen an geerntetem Holz verglichen, die 2021 in den Staatswäldern von Berlin und Brandenburg geschlagen wurden. Dieser Vergleich wird in Abbildung 39 dargestellt. Es wurden keine privaten, Bundesforste oder gewerblichen Wälder in die Berechnung einbezogen, da einheitliche Bewirtschaftungsstrategien für Waldanpassung und nachhaltiges Management nur für Staatswälder verfügbar waren. Die angegebenen Zahlen stehen für die geernteten Mengen an Kiefern- und Birkenholz. Da der Anteil von Birkenholz in Berlin und Brandenburg im Vergleich zur Kiefer minimal ist, wurde es bei den Berechnungen außer Acht gelassen. Aus diesem Grund beziehen sich die nachstehenden Angaben ausschließlich auf Kiefernholz. In den Berliner Staatswäldern wurden im Jahr 2021 rund 18.500 m³ Kiefernholz geschlagen (Destatis, 2022). Pro Jahr würde dies nur einen Teil des Bedarfs bei allen holzbasierten Bauweisen decken, die für das Schumacher Quartier diskutiert werden, da dieser je nach Bauweise zwischen 139.515 und 382.582 m³ Holz liegen würde. Das Schumacher Quartier gibt jedoch an, dass in den ersten zehn Baujahren nur die Hälfte der Gesamtholzmenge benötigt wird. Außerdem schreiben die Projektvorgaben vor, dass nur die Hälfte des Holzes aus Berlin stammen muss, da diese Hälfte von den landeseigenen Wohnungsbaugesellschaften gebaut wird. Deshalb könnte, wie in Abbildung 40 gezeigt, der Holzbedarf in den ersten zehn Jahren aus Berliner Beständen gedeckt werden.

Außerdem würde die durchschnittliche Jahresernte an Kiefernholz in den Staatswäldern von Brandenburg (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2023) für alle holzbasierten Bauweisen bei Weitem für den Bau des Schumacher Quartiers ausreichen, da pro Jahr etwa 879.100 m³ Holz aus diesen Quellen zur Verfügung stehen (Referenzjahr 2021).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Waldbestände in Berlin und Brandenburg wurden von den staatlichen Forstbehörden erkannt, weshalb derzeit einige regenerative Verfahren für die Waldanpassung entwickelt und umgesetzt werden (persönliches Gespräch mit der Berliner Landesforstverwaltung, 2023). Eine Strategie, um dies zu erreichen, ist der Übergang von vorherrschenden Monokulturen zu einem Mischwaldsystem. Dies impliziert, dass vormals reine Nadelwaldbestände mit nur einer Art, angepasst werden müssen, sodass in Berlin und Brandenburg auf lange Sicht weniger Kiefernholz und mehr Holz von Laubbäumen verfügbar sein wird und in den nächsten Jahrzehnten noch mehr Kiefernholz geerntet werden kann (persönliches Gespräch mit der Berliner Landesforstverwaltung, 2023). Heutzutage betrachtet die Baubranche in Deutschland Fichtenholz immer noch als die beliebteste

Baumart für den Holzbau (es macht 85 % des verarbeiteten Bauholzes aus).

Da die meisten Sägewerke ausschließlich auf die Verarbeitung von entweder Nadel- oder Laubbäumen spezialisiert sind, kann es sich als schwierig erweisen, die Branche für die Verarbeitung von deutlich größeren Anteilen von Laubhölzern anzupassen – zumindest kurzfristig (persönliches Gespräch mit der Binderholz GmbH, 2023).

3.5 UNSICHERHEITEN UND EINSCHRÄNKUNGEN

Im Rahmen der umfassenden Arbeiten zur Anwendung der Berechnungen zu Kohlenstoffbindung und Kohlenstoffemissionen des Schumacher Quartiers traten Unsicherheiten auf, die im Folgenden diskutiert werden.

3.5.1 EINGANGSDATEN

Die Ergebnisse basieren auf den Materialien für Wände, Rohdecken und Dachkonstruktionen. Diese machen nicht das gesamte Gebäude aus, da zum Beispiel Innenwände, Treppenhäuser, Aufzugsschächte usw. nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse können anders ausfallen, wenn alle Baustoffe einbezogen werden. Außerdem wurden die Daten für die Berechnung hauptsächlich einer Datenbank entnommen, deren Datensätze zwar im Allgemeinen aktuell, in einigen Fällen aber schon ein oder zwei Jahre veraltet waren. Für das Material Intensivsubstrat i-leicht waren keine Daten zur Bruttodichte verfügbar. Daher kann es sein, dass die Berechnungen den CO₂-Koeffizienten des Materials stark überschätzen.

Die Wahl anderer Holzsorten kann ebenfalls zu kleineren Schwankungen des Kohlenstoffgehalts der holzbasierten Baustoffe führen (Martin et al., 2018). Diese Möglichkeit könnte in umfassenderen Studien untersucht werden.

3.5.2 TRANSPORTEMISSIONEN

Die Transportemissionen basieren auf den Wegen zwischen Lieferantinnen und Lieferanten und dem Schumacher Quartier in Berlin. Da die Anbieterinnen und

Anbieter nicht immer auch Herstellerinnen und Hersteller eines bestimmten Baustoffs sind, wurde für einige Materialien der Transport zwischen dem Hersteller und dem Anbieter nicht bei der Berechnung des CO₂-Faktors bzw. des finalen Transportwegs berücksichtigt. Darüber hinaus wurde nicht überprüft, ob die voraussichtlichen Anbieterinnen und Anbieter in der Lage wären, die Baustoffe in der benötigten Menge zu liefern. Wirtschaftliche Aspekte wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

3.5.3 WEITERE UNSICHERHEITEN

Diese Studie legt den Fokus auf Kohlenstoffemissionen aus der Produktion und dem Transport von Baustoffen. Es wurden weder andere Umweltauswirkungen der verwendeten Baustoffe noch die Auswirkungen der Bau-, Nutzungs- und Lebensendphase berücksichtigt. Für die Funktion von Holz als Kohlenstoffsene ist der gesamte Lebenszyklus ausschlaggebend. Eine Kaskadennutzung von Holzprodukten ist wichtig, um ihre positiven Auswirkungen auf den Kohlenstoffzyklus zu vergrößern. Darüber hinaus können weitere Faktoren, wie die Energiequellen für die Produktion oder die Energieeffizienz des Gebäudes während der Nutzungsphase, ebenfalls in zukünftige Kohlenstoffanalysen von Gebäuden einbezogen werden.

Die Quantifizierung von Kohlenstoffflüssen wird trotzdem als guter Ansatz angesehen, um die Klimafreundlichkeit verschiedener Arten der Baukonstruktionen auf angemessene Weise zu bewerten, da diese Methode nicht nur die Kohlenstoffemissionen berücksichtigt, sondern auch das Kohlenstoffbindungspotenzial der Baustoffe beurteilt (Hart & Pomponi, 2020; Heckmann & Glock, 2023).

4

FAZIT

5

FINANZIERUNG

6

DANKSAGUNGEN

7

BEITRÄGE DER
AUTORINNEN
UND AUTOREN

8

ABBILDUNGS-
VERZEICHNIS

9

TABELLEN-
VERZEICHNIS

10

REFERENZEN

4.1 EMPFEHLUNGEN

Die beiden Massivholzbauweisen weisen die beste Leistung in Bezug auf das Verhältnis zwischen gebundenem und ausgestoßenem Kohlenstoff auf. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Thoma-Holzbauweise das höchste Verhältnis zwischen Kohlenstoffemissionen und -bindung hat (Abbildung 28). Es gilt jedoch, die Auswirkungen der Transportemissionen aufgrund großer Entfernungen zwischen Holzquellen und der Baustelle zu berücksichtigen. Die Transportemissionen können je nach Transportmittel, Standort der Produktionsstätten und Infrastruktur auf der Baustelle variieren. Obwohl die Thoma-Holzbauweise auch bei Berücksichtigung der Transportemissionen das beste Kohlenstoffverhältnis hat, ließe sich die Klimafreundlichkeit erheblich verbessern, wenn man die Transportwege reduzieren oder größere LKW oder Züge für den Transport verwendet würde.

Zusammenfassend lässt sich aus der vorliegenden Studie schlussfolgern, dass die betrachteten Arten der Baukonstruktionen im Hinblick auf ihre Klimaauswirkungen folgendermaßen eingestuft werden können: Den ersten Platz nehmen Massivholzbauweisen ein, gefolgt von Holzrahmen-Leichtbauweisen. Mineralbasierte Bauweisen belegen den letzten Platz.

4.2 AUSBLICK

Die Analyse weist darauf hin, dass die Verwendung von Holz als Hauptbaustoff die negativen Auswirkungen des Bauwesens auf den Kohlenstoffzyklus erheblich reduzieren kann. Außerdem kann das langfristige Kohlenstoffbindungspotenzial in holzbasierten Baustoffen einen positiven Beitrag zu urbanen Kohlenstoffbeständen leisten. Die steigende Nachfrage nach Holz lenkt die Aufmerksamkeit zudem auf die Forstwirtschaft. Nur dann, wenn Holzressourcen in wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Dimensionen nachhaltig gemanagt werden, kann die wachsende Holznachfrage ohne negative Folgen gedeckt werden. Die Forstwirtschaft sollte Wälder nicht nur als Holzquelle, sondern als vielfältiges, empfindliches Ökosystem betrachten. Eine nachhaltige Forstwirtschaft sollte daher einen vielfältigen Baumbestand, den aktiven Schutz der Böden und ihrer Kohlenstoffbestände und nachhaltige Erntemethoden fördern. Darüber hinaus kann die Förderung der natürlichen Waldregenerierung einen nützlichen Ansatz zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit

gegenüber natürlichen Störungen darstellen, die durch den Klimawandel begünstigt werden, und wichtige Funktionen aufrechterhalten, wie die Funktion als Kohlenstoffsink und die Holzproduktion.

4.3 ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSFRAGEN

Zukünftige Forschungsfragen könnten sich auf die nachhaltige Forstwirtschaft konzentrieren. Vor allem im regionalen Maßstab in Berlin und Brandenburg ist es für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Branchenexpertinnen und Branchenexperten von Interesse, welche Vorgaben und welcher gesetzlicher Rahmen benötigt werden, um eine nachhaltige Forstwirtschaft zu stärken. Wenn der Übergang zu einer stärker holzbasierten Baupraxis vorangetrieben wird, könnte die Gewährleistung ausreichender Holzmengen als Ersatz für etablierte mineralische Baustoffe ebenfalls zu einem wichtigen Thema für die zukünftige Forschung werden.

5 FINANZIERUNG

Diese Forschungsarbeit wurde von der Tegel Projekt GmbH im Rahmen des Projekts „Wälder, Städte und ihr Kohlenstoffkreislauf“ an der Technischen Universität Berlin gefördert. Es wurden finanzielle Mittel zur Verfügung gestellt, um Erkenntnisse zu lokalen Praktiken in der Forstwirtschaft und Holzverarbeitung zu gewinnen.

6 DANKSAGUNGEN

Wir möchten Sebastian Schubert für seinen Beitrag zur Entwicklung des numerischen CCA-Algorithmus danken. Außerdem möchten wir uns bei dem Team der Tegel Projekt GmbH, vor allem bei Stephanie Ambrosius-Groß, für die Einblicke in die Pläne für das Schumacher Quartier und die Daten für unsere Forschung sowie bei Farah Thoma für die Bereitstellung der Daten bedanken und bei Dirk Riestenpatt von den Berliner Forsten sowie bei Dr. Falk Stähr, Dr. Ulrike Hagemann und Stefan Kruppke vom Landesforstbetrieb Brandenburg dafür bedanken, uns informative Einblicke in die lokalen Wälder und Bewirtschaftungspraktiken gegeben zu haben. Unser Dank geht ebenfalls an Burkhardt Schröder von dem Unternehmen Max Holzbau sowie an Jan Pfeiffer, Bernd Ebert und Volker Berg von Binderholz Baruth in Brandenburg, die unser Interesse am Holzbau geweckt haben. Wir bedanken uns bei Yuma Amecke, Moritz Zafir Balk, Tatjana Balschus, Simon Barchewitz, Nary Götze, Melina Höfling, Emma Krög, Leonardo Ochoa, Maren Roos und Oliver Simon von der Technischen Universität Berlin für die durchgeführten Vorarbeiten und die gesammelten vorläufigen Daten zum Schumacher Quartier.

7 BEITRÄGE DER AUTORINNEN UND AUTOREN

Die Autorinnen und Autoren werden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt, mit Ausnahme von FT, CB und GC. GC hat mit Unterstützung von CB diesen Bericht konzeptualisiert und überwacht. FT entwickelte die sechs Arten der Baukonstruktion, einschließlich der jeweiligen Mengendichten und Dickspezifikationen. Alle Autorinnen und Autoren (mit Ausnahme von CB, GC und FT) haben die materialspezifischen Werte und Eigenschaften für die CCA recherchiert. Alle Autorinnen und Autoren (mit Ausnahme von CB, GC und FT) haben Recherchen zu den nächstgelegenen Baustoffanbieterinnen und -anbietern betrieben. Der numerische CCA-Algorithmus wurde von CB und GC entwickelt. HP stellte die Methode zur Berechnung des CO₂-Emissionsfaktors anhand der recherchierten GWP-Werte bereit. NK, LM und AN spielten eine entscheidende Rolle bei der Analyse der Daten und der Darstellung der Ergebnisse. Alle Autorinnen und Autoren haben an der Anfertigung des Manuskripts mitgewirkt. LK, AN und BH haben den Redaktionsprozess koordiniert und beaufsichtigt.

8 ABBILDUNGS- VERZEICHNIS

| | | | | | | | |
|--|-----------|--|-----------|--|-----------|---|-----------|
| Abbildung 1 | 07 | Abbildung 11 | 19 | Abbildung 23 | 25 | Abbildung 33 | 37 |
| Plan des Schumacher Quartiers, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023. Der rote Pfeil weist auf das in Abbildung 2 gezeigte vierstöckige Beispielgebäude hin | | Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Holzleichtbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Thoma-Holzbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die beim Massivholzbau in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | |
| Abbildung 2 | 07 | Abbildung 12 | 20 | Abbildung 24 | 26 | Abbildung 34 | 38 |
| Beispiel eines vierstöckigen Gebäudes, das für das Schumacher Quartier geplant ist, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau der Außenwand in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau der Außenwand in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Thoma-Holzbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | |
| Abbildung 3 | 15 | Abbildung 13 | 20 | Abbildung 25 | 26 | Abbildung 35 | 38 |
| Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Ziegelbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Aufbau der Rohdecken in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau der Rohdecken in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Vergleich der Kohlenstoffemissionen und Kohlenstoffbindung je nach Bauweise und Gebäudeteil | |
| Abbildung 4 | 16 | Abbildung 14 | 20 | Abbildung 26 | 26 | Abbildung 36 | 40 |
| Aufbau der Außenwand in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau des Dachs in der Holzleichtbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau des Dachs in der Thoma-Holzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Transportwege der Materialien mit dem höchsten Gewichtsanteil an jeder der Bauweisen bis zur Baustelle im Schumacher Quartier in Berlin (eigene Darstellung, LK) | |
| Abbildung 5 | 16 | Abbildung 15 | 21 | Abbildung 27 | 27 | Abbildung 37 | 41 |
| Aufbau der Rohdecken in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Holzrahmenbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Transportwege für den Beispielbaustoff Stahlbeton | | Vergleich des Anstiegs der Kohlenstoffemissionsverhältnisse in Bezug auf die Transportwege für jede Bauweise. Achsenschnittpunkt: Produktionsstätte innerhalb der Baustelle | |
| Abbildung 6 | 16 | Abbildung 16 | 22 | Abbildung 28 | 33 | Abbildung 38 | 41 |
| Aufbau des Dachs in der Ziegelbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau der Außenwand in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Oben: Kohlenstoffemissionen aus der Produktion von Baustoffen (A1–A3), dem Transport von Baustoffen von der Produktionsstätte zur Baustelle (A4) und der Kohlenstoffbindung der Materialien nach Bauweise, skaliert für alle 123 Gebäude des Schumacher Quartiers. Unten: Verhältnis zwischen der Kohlenstoffbindung und den Kohlenstoffemissionen aus der Produktion und Verhältnis zwischen der Kohlenstoffbindung und den Kohlenstoffemissionen aus der Produktion und dem Transport für alle Bauweisen. Werte aus Tabelle 3 | | Vergleich der Kohlenstoffemissionen verschiedener Transportmittel. Die Spalten zeigen Emissionen von verschiedenen Transportmitteln im Verhältnis zu den Emissionen von in der Analyse verwendeten Klein-LKW | |
| Abbildung 7 | 17 | Abbildung 17 | 22 | Abbildung 29 | 34 | Abbildung 39 | 42 |
| Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Stahlbetonbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Aufbau der Rohdecken in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Ziegelbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | | Benötigte Mengen an geschlagenem Holz für das Schumacher Quartier (Balken in Hellgrün) und jährlich verfügbares geschlagenes Holz in den Staatswäldern von Berlin und Brandenburg für 2021 (Balken in Dunkelgrün) | |
| Abbildung 8 | 18 | Abbildung 18 | 22 | Abbildung 30 | 35 | Abbildung 40 | 42 |
| Aufbau der Außenwand in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau des Dachs in der Holzrahmenbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Stahlbetonbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | | Benötigte Mengen an geschlagenem Holz für die ersten 10 Baujahre im Schumacher Quartier und verfügbares geschlagenes Kiefernholz über einen Zeitraum von 10 Jahren | |
| Abbildung 9 | 18 | Abbildung 19 | 23 | Abbildung 31 | 36 | | |
| Aufbau der Rohdecken in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gewichtsanteile von organischen und anorganischen Baustoffen am Gesamtgewicht eines Gebäudes in Massivholzbauweise. Eine Liste der Materialien mit einem Gewichtsanteil unter 1 % ist in Tabelle 2 enthalten | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die bei der Holzleichtbauweise in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | | | |
| Abbildung 10 | 18 | Abbildung 20 | 24 | Abbildung 32 | 36 | | |
| Aufbau des Dachs in der Stahlbetonbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Aufbau der Außenwand in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | Gesamte Kohlenstoffemissionen und -bindung von Baustoffen, die beim Holzrahmenbau in Wänden, Decken und dem Dach verwendet werden | | | |
| | | Abbildung 21 | 24 | | | | |
| | | Aufbau der Rohdecken in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | | | | |
| | | Abbildung 22 | 24 | | | | |
| | | Aufbau des Dachs in der Massivholzbauweise, Tegel Projekt GmbH, Berlin 2023 | | | | | |

9 TABELLEN- VERZEICHNIS

Table 1

Alle Baumaterialien, ihre deutsche Übersetzung, Kategorisierung in organische oder anorganische Materialien, die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Werte ihres jeweiligen CO₂-Emissionskoeffizienten sowie der Biomasseanteil und das Kohlenstoffverhältnis der Materialien sowie Quellenangaben.

Table 2

Materialgewicht (t), Anteil am Bauteil (%), Anteil an einem Beispielgebäude der Bauweise (%) und Beitrag des Bauteils zum Gewicht eines Beispielgebäudes der Bauweise (%).

Table 3

Eingaben und Output des CCA-Modells: Materialien jeder Komponente jeder Bauweise, ihre Materialgruppe, ihr auf das Schumacher Quartier hochskaliertes Gewicht, skalierte Kohlenstoffspeicherung (t), skalierte C-Emissionen von Produktion und Transport (t).

>>> [Zugriff über den QR-Code auf Seite 55](#)

10 REFERENZEN

- Ambrosius-Groß, S., Thoma, F., & Churkina, G. (2023, April 20). Klimaneutral Bauen in der Urban Tech Republic [Presentation]. Tegel Projekt GmbH, Berlin.
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., Cavard, X. (2021). Forest Carbon Management: A Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 7(4), 245–266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. (2023). Holzeinschlag im Land Brandenburg 2022 (Statistischer Bericht C V 1 - j/22; S. 24). Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/c-v-1-j>
- Arehart, J. H., Hart, J., Pomponi, F., & D'Amico, B. (2021). Carbon sequestration and storage in the built environment. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1047–1063. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.028>
- Arnold, A. I. M., et al., 2016; Martínez-Sancho et al., 2022; Palviainen et al., 2020
- Arnold, A. I. M., Grüning, M., Simon, J., Reinhardt, A.-B., Lamersdorf, N., & Thies, C. (2016). Forest defoliator pests alter carbon and nitrogen cycles. *Royal Society Open Science*, 3(10), 160361. <https://doi.org/10.1098/rsos.160361>
- BMWSB. (o. D.). Ökobaudat [Database]. ÖKOBAUDAT Informationsportal Nachhaltiges Bauen. https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html
- Bowyer, J., Bratkovich, S., Frank, M., Howe, J., Stai, S., & Fernholz, K. (2012). Carbon 101: Understanding the carbon cycle and the forest carbon debate. Dovetails Partners.
- Budzinski, M., Bezama, A., & Thrän, D. (2020). Estimating the potentials for reducing the impacts on climate change by increasing the cascade use and extending the lifetime of wood products in Germany. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100034>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (2023). Handreichung Holzbauinitiative (S. 21).
- Carlson, C. A., Bates, N. R., Hansell, D. A., & Steinberg, D. K. (2008). Carbon Cycle. In J. H. Steele (Hrsg.), *Encyclopedia of ocean sciences* (2. ed.). Elsevier. <http://www.sciencedirect.com/science/referenceworks/9780123744739>
- Chen, G., Shen, H., Cao, J., & Zhang, W. (2016). The influence of tree species on carbon storage in northern China. *The Forestry Chronicle*, 92(03), 316–321. <https://doi.org/10.5558/tfc2016-058>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Grae-del, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Dangel, U. (2017). Wendepunkt im Holzbau. Birkhäuser Verlag.
- De Wolf, C., Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*, 140, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>
- Destatis. (2022). Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Forstwirtschaftliche Bodennutzung – Holzeinschlagsstatistik – (Statistischer Bericht, Fachserie 3, Reihe 3.3.1). https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/Publikationen/Downloads-Wald-und-Holz/holzeinschlag-2030331217004.pdf?_blob=publicationFile
- DIN e. V. (ed.) (2003). DIN 68364 | 2003-05, Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. Beuth-Verlag. <https://www.baunormenlexikon.de/norm/din-68364/4907cbb4-566d-4673-8e49-200c67c46351>
- Dodd, N., Cordella, M., & Donatello, S. (2021). Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP). Joint Research Centre. https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM3_Indica-tor_1.2_v1.1_37pp.pdf
- Europäische Umweltagentur. (2014). Resource-efficient green economy and EU policies. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/18514>
- Hart, J., & Pomponi, F. (2020). More Timber in Construction: Unanswered Questions and Future Challenges. *Sustainability*, 12(8), 3473. <https://doi.org/10.3390/su12083473>
- He, Y., Qin, L., Li, Z., Liang, X., Shao, M., & Tan, L. (2013). Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 295, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.020>
- Heckmann, M., & Glock, C. (2023). Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. *Beton- und Stahlbetonbau*, 118(2), 110–123. <https://doi.org/10.1002/best.202200102>
- Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. *Sustainable Cities and Society*, 34, 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>
- Höglmeier, K., Steubing, B., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2015). LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. *Journal of Environmental Management*, 152, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.018>
- IEA. (2022). World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers (Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero {eds.}], S. 36). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Johnson, D. W., & Curtis, P. S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140(2–3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6)
- Lauk, C., Haberl, H., Erb, K.-H., Gingrich, S., & Krausmann, F. (2012). Global socioeconomic carbon stocks in long-lived products 1900–2008. *Environmental Research Letters*, 7(3), 034023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034023>
- Made of Air. (o. D.). Made of Air. Learn how we put carbon to work. <https://www.madeofair.com/our-process>
- Martin, A. R., Doraisami, M., & Thomas, S. C. (2018). Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *nature geoscience*, 11(12), 915–920. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0246-x>
- Martínez-Sancho, E., Treydte, K., Lehmann, M. M., Rigling, A., & Fonti, P. (2022). Drought impacts on tree carbon sequestration and water use – evidence from intra-annual tree-ring characteristics. *New Phytologist*, 236(1), 58–70. <https://doi.org/10.1111/nph.18224>
- Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg. (2015). Wälder Brandenburgs. Ergebnisse der ersten landesweiten Waldinventur. https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/LWI_Broschuere2015.pdf
- Neuhaus, H. (2017). Ingenieurholzbau. Grundlagen – Bemessung – Nachweise – Beispiele. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14178-3>
- Organschi, A., Ruff, A., Carbone, C., Herrmann, E., & Oliver, C. (2016, August 25). Timber City: Growing an Urban Carbon Sink with Glue, Screws, and Cellulose Fiber.

IMPRESSUM

Tegel Projekt GmbH
Urban Tech Republic, Gebäude V
Flughafen Tegel 1
13405 Berlin

Vertreten durch
Gudrun Sack
Frank Wolters

Projektteam Tegel Projekt GmbH

Gudrun Sack, Simon Wimmer, Farah Thoma, Stephanie Ambrosius-Groß, Anastasia Derenko, Constanze Döll

Projektteam Technische Universität Berlin

Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt,
Fachgebiet Stadtökologie:
Prof. Galina Churkina, Daria Dzhurko, Ben Haacke, Asta Haberbosch, Linde Köhne, Nora König, Frida Lode, Antonia Marx, Luka Mühlnickel, Nina Neunzig, Annika Niemann, Henrieke Polewka, Lea Schmidtke, Pia Luz von der Groeben, Karl Wagemann und Clemens Bothe

Grafische Gestaltung

Silke Stadtkus

Lektorat | Korrektorat

Tolingo GmbH;
Werkstatt für moderne Sprache Peter Schuhgart

Übersetzung

Tolingo GmbH; Apostroph Germany GmbH

Kommunikationsagentur

BEST FRIEND Agentur für Kommunikation GmbH

Druck

PIEREG Druckcenter Berlin GmbH

Hinweise zum Zitieren

Technische Universität Berlin:
Daria Dzhurko, Ben Haacke, Asta Haberbosch, Linde Köhne, Nora König, Frida Lode, Antonia Marx, Luka Mühlnickel, Nina Neunzig, Annika Niemann, Henrieke Polewka, Lea Schmidtke, Pia Luz von der Groeben, Karl Wagemann, Clemens Bothe und Galina Churkina
Tegel Projekt GmbH:
Gudrun Sack, Farah Thoma und Simon Wimmer.
„Wälder, Städte und ihr Kohlenstoffkreislauf – Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Arten der Baukonstruktion auf den Kohlenstoffhaushalt im Schumacher Quartier, Berlin“
Januar 2024

Hinweise zu den Abbildungen

Die Abbildungen 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40 stehen unter
© Technische Universität Berlin Fachgebiet Stadtökologie, Berlin 2024

Gedruckt in Deutschland

auf PIEREG Recycling.
PIEREG Recycling wird zu 100 % aus Altpapier gefertigt.
Frischfaser wird nicht für die Herstellung genutzt.

Alle Rechte vorbehalten, auch auszugsweise.
Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, mit Quellenangabe gestattet.

Copyright © 2024
Tegel Projekt GmbH, Berlin
www.urbantechrepublic.de

- DOI Anhang:
<https://doi.org/10.14279/depositonce-18840>
- DOI deutsche Version:
<https://doi.org/10.14279/depositonce-18841>
- DOI englische Version:
<https://doi.org/10.14279/depositonce-18843>



