Abschlussbericht
DBU-Az. 39497/01

HOLZ-LEHM-HYBRID

Reallabor für regeneratives und zirkuläres Bauen in der Region Berlin-Brandenburg

BAUHAUS ERDE

B&O BAU

sauerbruch hutton

Industrieverband Lehmbaustoffe e.V.

LANDESBEIRAT HOLZ Berlin / Brandenburg

Holz-Lehm-Hybrid

Reallabor für regeneratives und zirkuläres Bauen in der Region Berlin-Brandenburg

Abschlussbericht über ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az. 39497/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Bewilligungsempfängerin und Forschungsleitung
Bauhaus der Erde gGmbH

Kooperationspartner*innen
B&O Bau und Gebäudetechnik GmbH & Co. KG
Sauerbruch Hutton Gesellschaft von Architekten mbH
Industrieverband Lehmbaustoffe e. V.
Landesbeirat Holz Berlin-Brandenburg e. V.

Verfasser*innen
Stefan Anders
Cara Emberger
Christian Gäth
Vera Hartmann
Patricia Jeglitsch
Micha Kretschmann
Prof. Dr. Philipp Misselwitz
Dr. Friederike Münn
Peter Münn
Dr. Denny Ohnesorge
Dr. Ipek Ölcüm
Marc Stellmach
Michel Reckhaus
Ludwig Thanhäuser
Theresa Zschäbitz

Berlin, August 2026

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 5
Abbildungsverzeichnis 6
Abkürzungsverzeichnis 7

1 Einleitung 8
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 8
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung 10

2 Projektstruktur und -methode 12
2.1 Projektaufbau und Reallabor-Ansatz 12
2.2 Materialstrategie 13
2.3 Methodik einer projektbegleitenden Forschung 14
2.4 Struktur der Arbeitspakete 15
2.5 Arbeitspaket 1: Entwicklung innovativer Bauteile 16
Identifizierung relevanter Bauteile 16
Initialer Bauteilentwurf 16
Ökologische Bewertung als Entwurfsinstrument 16
Prototyping 19
Umsetzung im Bauprojekt 20
Ökonomische, technologische und regulatorische Einordnung 20
2.6 Arbeitspaket 2: Bauforschung und Monitoring 21
Monitoringkonzept 21
Messstrategie und Verortung 22
Zeitliche Umsetzung 24
2.7 Arbeitspaket 3: Projektbegleitung und Kommunikation 24
Kommunikationsformate 24
Transferstrategie 24
Zielgruppen 25

3 Ergebnisse 26
3.1 Arbeitspaket 1: Entwicklung und Optimierung innovativer Bauteile 26
Re-Use-Fundamente 26
Holz-Bodenplatte 29
Tragendes Lehmsteinmauerwerk 32
Holz-Gebäudeabschlusswand 35
Holz-Lehm-Hybriddecke 38
Bauteilübergreifende Zusammenfassung der Ergebnisse 42
3.2 Arbeitspaket 2: Bauforschung und Monitoring 47
Funktionale Sicherheit und Bauteilverhalten 47
Baubiologische und innenraumklimatische Qualität 48
Energieeffizienz und Umweltwirkung im Betrieb 49
Fortführung des Monitorings 49
3.3 Arbeitspaket 3: Projektbegleitung und Kommunikation 50
Veranstaltungen und Vor-Ort-Formate 51
Publikationen und Fachbeiträge 52
Ergebnisaufbereitung und zielgruppenspezifischer Wissenstransfer 52

4 Diskussion 54
4.1 Zielerreichung und Abweichungen vom geplanten Vorhaben 54
4.2 Bauteilübergreifende Einordnung der Ergebnisse 54
Ökologische Einordnung 55
Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung 58
4.3 Bedeutung des Reallabor-Ansatzes, Übertragbarkeit und Grenzen 60

5 Fazit und Ausblick 62

Literaturverzeichnis 64
Anhänge 67
Anhang A – Bauteilbezogene Ergebnisdokumentation 67
Anhang B – Bauteilübergreifende Bewertung und Materialkreisläufe 107
Anhang C – Monitoring 117
Anhang D – Kommunikation und Transfer 120

Technische Anlagen – gesondert beigefügt

TA 01-1 – Druckfestigkeitsprüfung des Bestandsbetons, Kiwa GmbH, 18.03.2024
TA 01-2 – Gründungsstatik der Re-Use-Fundamente, Kapitel I, FSE, 13.06.2024
TA 02-1 – VOC-Materialuntersuchung, TH Rosenheim, 2025
TA 02-2 – Teilbericht II – Zelluläre Analyse der Materialien, TH Rosenheim, 2025
TA 02-3 – Prüfbericht zur Innenraumluftqualität, IQUH, Bericht vom 23.06.2026; Messungen vom 18.12.2025 und 09.04.2026

Zusammenfassung

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt Holz-Lehm-Hybrid untersuchte, wie regenerative und zirkuläre Bauweisen unter realen Bedingungen von Planung, Genehmigung, Produktion und Bauausführung entwickelt und umgesetzt werden können. Im Holz-Lehmbau Campus Berlin wurden fünf ökologisch besonders relevante Bauteile bearbeitet: Re-Use-Fundamente aus Bestandsbeton, eine unterlüftete Holz-Bodenplatte, ein tragendes, vorgefertigtes Lehmsteinmauerwerk, eine tragende Gebäudeabschlusswand in Holzbauweise sowie eine Holz-Lehm-Hybriddecke mit industriell gefertigten Lehmeinhangsteinen.

Die Bauteilentwicklung erfolgte in einem iterativen Reallaborprozess, der Entwurf, ökologische Bewertung, Prototyping, industrielle Fertigung, bauliche Umsetzung, Monitoring und Wissenstransfer über den gesamten Projektzeitraum miteinander verknüpfte. Neben vergleichenden Lebenszyklusanalysen wurden die projektspezifischen Transportwege und die Zirkularität der entwickelten Konstruktionen untersucht.

Gegenüber den jeweiligen konventionellen funktionalen Äquivalenten weist die Lebenszyklusanalyse Reduktionen des GWP-total zwischen rund 55 % und 85 % aus. In der ungewichteten bauteilübergreifenden Vergleichsbetrachtung verringert sich das summierte GWP-total um 77,1 %. Auch in der Zirkularitätsbewertung erreichen die entwickelten Bauteile mit 43,9 bis 71,5 Punkten deutlich höhere Werte als die Vergleichskonstruktionen mit 14,4 bis 28,2 Punkten. Die Transportanalyse zeigt zugleich, dass Transportemissionen nicht allein von der zurückgelegten Distanz abhängen, sondern im Zusammenhang mit Rohdichte und eingesetzter Materialmenge bewertet werden müssen.

Technologisch konnten unter anderem Bestandsbeton für eine erneute tragende Verwendung qualifiziert, tragende Lehmwandsegmente vorgefertigt und die Herstellung ungebrannter Lehmeinhangsteine von der prototypischen Entwicklung in ein industrielles Strangpressverfahren überführt werden.

Für das bauteil- und raumbezogene Monitoring wurden die erforderliche Sensorik und das Messkonzept eingerichtet. Erste Funktionskontrollen an den untersuchten Holzbauteilen ergaben keine Hinweise auf einen Feuchteeintrag. Aufgrund der verzögerten Fertigstellung und Inbetriebnahme müssen die kontinuierlichen Messungen zum Feuchte- und Temperaturverhalten der Bauteile sowie zum betrieblichen Energieverbrauch und die ergänzenden Untersuchungen zur Innenraumluftqualität, zur thermischen Wirkung und zur Bauakustik im weiteren Monitoring fortgeführt werden.

Publikationen, Vorträge, Führungen und die Abschlussausstellung vermittelten die Ergebnisse in Wissenschaft, Planung, Baupraxis und Öffentlichkeit. Das Vorhaben zeigt, dass regenerative und kreislauffähige Bauteile bereits heute unter realen Bedingungen umgesetzt werden können. Für ihre breitere Anwendung sind jedoch standardisierte Prüf- und Nachweisverfahren, produktspezifische Umweltdaten, regionale Wertschöpfungs- und Produktionsstrukturen, belastbare Kostenmodelle sowie weitere Pilotvorhaben erforderlich.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Paradigmenwechsel im Bauen	9
Abb. 2	Firmengelände von B&O Bau und Gebäudetechnik	12
Abb. 3	Visualisierung HLCB nach Fertigstellung Ende 2026	12
Abb. 4	Projektmethodik	14
Abb. 5	Darstellung des Projektverlaufs	15
Abb. 6	Bewertungsmatrix zur Zirkularität	19
Abb. 7	Monitoringkonzept	23
Abb. 8	Fünf innovative Bauteile	26
Abb. 9	GWP-total im Vergleich: HLH und Konvention	43
Abb. 10	Materialherkünfte und Transportwege der Primärmaterialien	44
Abb. 11	Transportdistanzen und -emissionen der Primärmaterialien	45
Abb. 12	Zirkularität im Vergleich: HLH und Konvention	46

Abkürzungsverzeichnis

2DF	zweifaches Dünnformat
3DF	dreifaches Dünnformat
AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte
AP	Arbeitspaket
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BSH	Brettschichtholz
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CPX	Circularity Performance Index
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DBZ	Deutsche BauZeitschrift
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EN	Europäische Norm
EPS	expandiertes Polystyrol
FBH	Fußbodenheizung
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GWP	Global Warming Potential
GWP-total	gesamtes Treibhauspotenzial
HLCB	Holz-Lehmbau Campus Berlin
HLH	Holz-Lehm-Hybrid
ISO	International Organization for Standardization
KNX	Standard für die Gebäudeautomation
KVH	Konstruktionsvollholz
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RC	Recycling
RW I / RW II	Richtwert I / Richtwert II
TA	Technische Anlage
THG	Treibhausgas
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
UBA	Umweltbundesamt
VOC	Volatile Organic Compounds
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Eine der wesentlichen Ursachen der globalen Erderwärmung liegt in der anthropogenen Entkopplung zentraler Stoff- und Kohlenstoffkreisläufe unseres Erdsystems von ihren natürlichen Regenerationsprozessen. Dies zeigt sich insbesondere in der intensiven Nutzung nicht erneuerbarer Rohstoffe und der fortschreitenden Degradation von Ökosystemen, durch die mehr Kohlenstoff freigesetzt wird, als natürliche Prozesse binden können. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Gebäude- und Bausektor, der weltweit rund 37 % der CO_2-Emissionen verursacht [GSR26], nahezu 50 % des globalen Materialverbrauchs beansprucht [UNEP21] und rund 33 % des Abfallaufkommens erzeugt [GSR25]. Gerade darum liegt in ihm auch der stärkste Hebel die Klimakrise zu bewältigen. Einen wesentlichen Ansatzpunkt bilden die materialgebundenen beziehungsweise grauen Emissionen, die bei Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Errichtung, Instandhaltung und Rückbau von Gebäuden entstehen. Der weitgehende Ersatz emissionsintensiver Baustoffe wie Stahl und zementgebundener Materialien durch naturbasierte Materialien wie Holz und Lehm kann diese Emissionen drastisch reduzieren. Biogene Baustoffe wie Holz können darüber hinaus Kohlenstoff, der zuvor der Atmosphäre entzogen wurde, über ihre Nutzungsdauer temporär speichern. Diese doppelte Wirkung entfaltet ihr Potenzial jedoch nur, wenn der Ansatz über die reine Substitution einzelner Baustoffe hinausgeht.

Es bedarf eines Paradigmenwechsels – weg von einer reinen Vermeidungsstrategie, hin zu einem regenerativen Verständnis von Nachhaltigkeit, das neben der Minimierung von Umweltbelastungen auch die aktive Wiederherstellung von Ökosystemen einbezieht [Ree07]. Die gebaute Umwelt ist dabei in ihrer physischen Erscheinung und in ihrer regionalen Einbettung samt der damit verbundenen Stoff- und Materialströme zu verstehen. Je nach bioregionalem Kontext resultiert aus einem regenerativen Ansatz im Bauwesen eine vielfältige Baukultur, die die Entkoppelung der globalisierten Moderne von ihren ökologischen Kontexten überwindet und eine Architektur hervorbringt, die auf die Rahmenbedingungen ihrer jeweiligen Ökosysteme reagiert.

Dieser Paradigmenwechsel lässt sich in sechs komplementären Dimensionen beschreiben, die zusammen den Rahmen einer konsequenten Bauwende bilden [GK23]. *Vermeidung* bedeutet, vorhandene Bausubstanz zu nutzen und Rückbau gegenüber Abriss zu priorisieren. *Ökologisierung* steht für den Ersatz emissionsintensiver und fossilbasierter Baustoffe durch naturbasierte Materialien wie Holz oder Lehm, die Treibhausgasemissionen reduzieren, Ressourcen schonen und die gebaute Umwelt durch langfristige Kohlenstoffspeicherung in eine globale Kohlenstoffsenke verwandeln [Chu20]. *Regionalisierung* zielt darauf ab, Baustoffe aus dem jeweiligen bioregionalen Kontext heraus zu denken, lokal verfügbare Ressourcen nutzbar zu machen und regionale Wertschöpfungsketten zu stärken. *Diversifizierung* adressiert die Frage, wie naturbasierte Materialien optimal kombiniert werden können, um ihre jeweiligen konstruktiven, ökologischen und

bauphysikalischen Qualitäten wirksam zu machen. *Wiederverwendung* verfolgt das Ziel, Materialien und Bauteile so zu planen, zu fügen und zu dokumentieren, dass sie zerstörungsfrei rückgebaut und für einen Wiedereinsatz möglichst ohne Qualitätsverlust vorbereitet werden können. Die von Menschen verursachte Klimakrise ist dabei nicht nur eine ökologische, sondern vor allem eine gesellschaftliche Herausforderung. *Fairness* bildet daher das ethische Fundament einer regenerativen Bauwende. Sie umfasst eine gerechte Verteilung von Ressourcen und Umweltwirkungen, den Zugang zu Wissen und Innovation sowie die Stärkung handwerklicher Kompetenzen und lokaler Unternehmen.

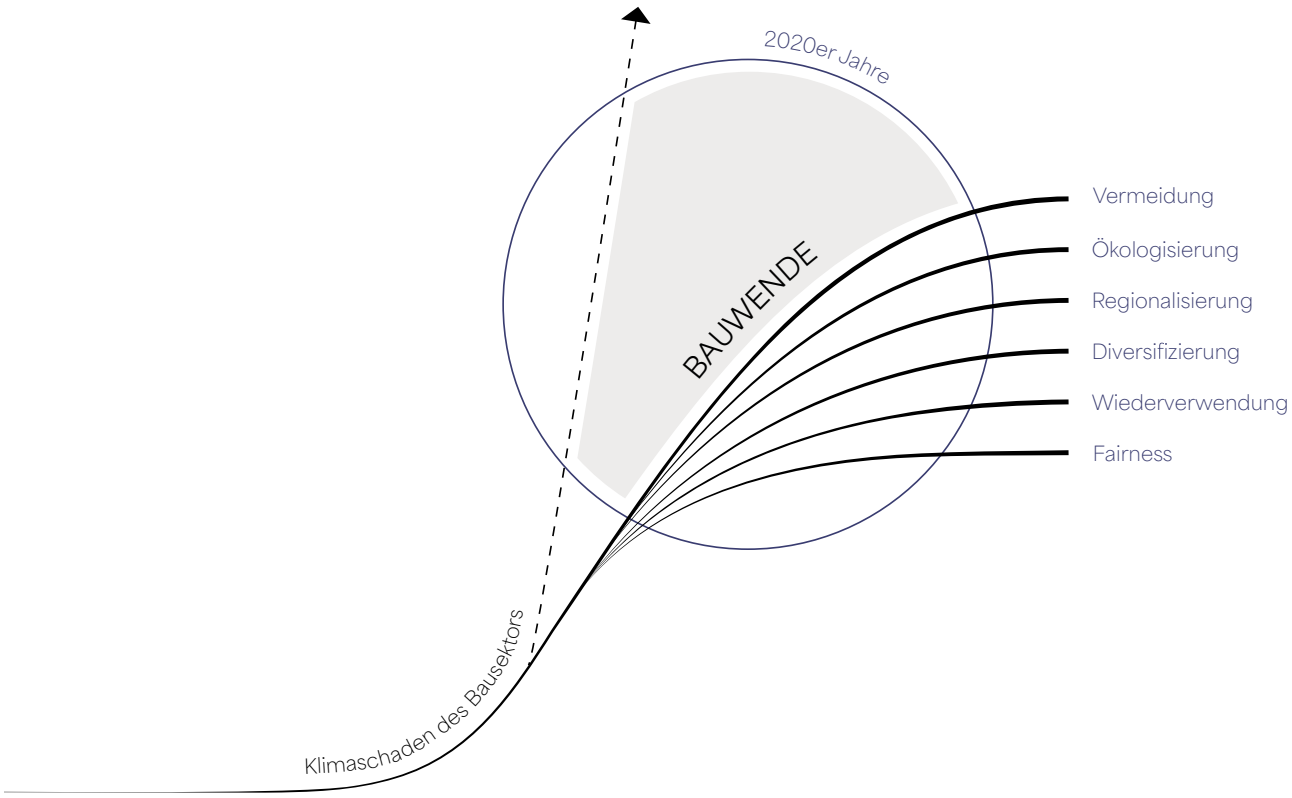


Abb. 1:
Paradigmenwechsel im Bauen. Quelle: [GK23].

In den vergangenen Jahren wurde der theoretische Unterbau der beschriebenen Bauwende zunehmend in reale Bauvorhaben übersetzt. Insbesondere das Bauen mit Holz konnte sich als wichtige Säule der Transformation etablieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass sich die Transformation des Bauwesens nicht auf Holz als Universallösung beschränken darf. Weitere naturbasierte Baustoffe müssen identifiziert, normativ abgesichert und in tragenden Konstruktionen unter realen Bedingungen erprobt werden. Für den Baustoff Lehm wurden zuletzt wichtige Voraussetzungen geschaffen: Die im Juni 2023 veröffentlichte DIN 18940 [DIN18940] regelt tragendes Lehmsteinmauerwerk bis einschließlich Gebäudeklasse 4.

Eine vergleichbare Lücke besteht bei der Wiederverwendung tragender Bauteile. Trotz ihres technischen Potenzials werden rückgewonnene Bauteile nach dem Rückbau häufig abgewertet. Auch hier mangelt es weniger an grundsätzlicher technischer Machbarkeit als an Erfahrungen, Nachweisverfahren und gebauten Referenzen, die für ihren gleichwertigen Wiedereinsatz bislang nur begrenzt verfügbar sind.

In der Bauforschung zeigt sich darüber hinaus, dass der Einsatz innova-

tiver und regenerativer Bauteile bislang nur auf geringe praktische Erfahrungswerte zurückgreifen kann. Entsprechend sind die anzuwendenden Regelwerke häufig von hohen Sicherheitsbeiwerten geprägt. Diese ermöglichen zwar erste praktische Anwendungen innovativer Bauweisen, verdeutlichen aber zugleich die Bedeutung realisierter Referenzprojekte. Erst durch praktische Erfahrungen lassen sich bestehende Annahmen überprüfen, Wissenslücken schließen und Bemessungs-, Bewertungs- und Nachweisverfahren weiterentwickeln. Reallabore können hierzu einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie Erkenntnisse unter realen Bedingungen generieren, neue Ansätze erproben und damit die Grundlage für eine breitere Anwendung innovativer Lösungen schaffen [Ber21].

Hinzu kommt ein strukturelles Defizit im Wissenstransfer. Derzeit werden Projekte mit regenerativen Baustoffen überwiegend von Akteur*innen realisiert, die sich dem Ausmaß des Klimawandels bewusst sind und bereit sind, den damit verbundenen Mehraufwand zu tragen. Forschung und Anwendung bewegen sich dabei häufig in einer Echokammer, aus der große Teile der Bauindustrie, der Bauherrenschaft und der politischen Entscheidungsebenen nicht erreicht werden können. Selbst vorbildlichen Bauprojekten fehlt oftmals eine zugängliche Projektbegleitung und Dokumentation, um ihre Erkenntnisse in der Breite der Bauindustrie sichtbar zu machen.

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, den beschriebenen Paradigmenwechsel im Rahmen eines realen Bauprojekts in direkte Anwendung zu bringen und regenerative Bauweisen unter praxisnahen Bedingungen kontinuierlich weiterzuentwickeln. Das Projekt versteht sich dabei nicht als abgeschlossener Idealzustand, sondern als baulicher Erprobungsraum, in dem ökologische Zielsetzungen mit den technischen, regulatorischen und logistischen Anforderungen der Baupraxis zusammengeführt wurden.

Ein zentraler Anspruch bestand darin, regenerative Materialien, zirkuläre Konstruktionsprinzipien und ressourcenschonende Herstellungsprozesse innerhalb bestehender Rahmenbedingungen anwendbar zu machen. Normkonformität wurde dabei nicht als Einschränkung verstanden, sondern als Voraussetzung für eine breite Anwendbarkeit und Übertragbarkeit. Nur wenn neue konstruktive Lösungen im Rahmen bestehender Regelwerke geplant, geprüft und umgesetzt werden können, lassen sie sich über den prototypischen Einzelfall hinaus etablieren.

Gleichzeitig zielte das Vorhaben darauf ab, regenerative Bauweisen von Beginn an skalierbar zu denken. Die entwickelten Lösungen sollten nicht als handwerkliche Sonderlösungen verbleiben, sondern in wiederholbare und wirtschaftlich tragfähige Prozesse überführt werden. Serielle Vorfertigung, reproduzierbare Herstellungsabläufe sowie die Integration in bestehende Produktionsprozesse und Infrastrukturen bildeten daher zentrale Entwicklungskriterien.

Die projektbegleitende Bauforschung sollte hierfür eine belastbare Wissens- und Datengrundlage schaffen. Durch ökologische Bewertung, Prototyp und bauliche Umsetzung sollten Erkenntnisse zur technischen, ökologischen und praktischen Leistungsfähigkeit der untersuchten Bauteile unter realen Bedingungen gewonnen werden. Das Monitoring war darauf

ausgerichtet, diese Erkenntnisse im weiteren Gebäudebetrieb um langfristige Daten zum Bauteilverhalten, zur Innenraumqualität und zum Energieverbrauch zu ergänzen.

Das Gebäude dient dabei sowohl als Forschungsgegenstand als auch als gebaute Referenz für nachfolgende Anwendungen. Übertragbarkeit entsteht jedoch nicht allein durch die bauliche Umsetzung, sondern ebenso durch systematische Dokumentation, Auswertung und Wissenstransfer. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden damit eine Grundlage für die weitere Erprobung, Anwendung und Weiterentwicklung regenerativer Bauweisen in zukünftigen Projekten.

2 Projektstruktur und -methode

2.1 Projektaufbau und Reallabor-Ansatz

Den baulichen Rahmen bildet der Holz-Lehmbau Campus Berlin der B&O Bau und Gebäudetechnik in Berlin-Weißensee. Im Zuge des Um- und Ausbaus des Firmensitzes entsteht ein Büro- und Ausbildungsgebäude mit Ausstellungs- und Veranstaltungsflächen sowie Außenräumen. Das Gebäude wurde so geplant, dass seine räumlichen Strukturen zukünftig an veränderte Anforderungen angepasst werden können und dadurch vielfältige Nutzungs- und Umnutzungspotenziale entstehen. Die im Projekt entwickelten Bauteile sind zugleich in ihrer konstruktiven Logik über die konkrete Anwendung im Bauvorhaben hinaus angelegt und somit auf andere Gebäudetypologien übertragbar.

↑ Abb. 2:
Firmengelände B&O Bau und Gebäudetechnik 2024.
Foto: Jan Bitter.

→ Abb. 3:
Visualisierung HLCB nach Fertigstellung Ende 2026.
Visualisierung: B&O Bau und Gebäudetechnik.

Das Forschungsprojekt Holz-Lehm-Hybrid wurde als Reallabor konzipiert und nach Beginn der Planung in das bestehende Bauvorhaben integriert. Die entwickelten Bauteile wurden dabei nicht isoliert untersucht, sondern als Bestandteile des Gebäudes geplant, gefertigt und umgesetzt. So konnten technische, regulatorische, logistische und organisatorische Anforderungen unmittelbar im Bauprozess bearbeitet und die entwickelten Lösungen unter realen Bedingungen auf ihre Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit überprüft werden.

Zentral für diesen Ansatz war die enge Zusammenarbeit der beteiligten Akteur*innen. Wissenschaftliche Untersuchung, architektonischer Entwurf, industrielle Fertigung und handwerkliche Ausführung wurden fortlaufend aufeinander abgestimmt. Dadurch ließen sich ökologische Zielsetzungen mit gestalterischen, wirtschaftlichen und genehmigungsrechtlichen Anforderungen verbinden.

Bauhaus Erde übernahm die wissenschaftliche Leitung. B&O Bau und Gebäudetechnik wirkte als Projektträger, Finanzierungspartner und aktiver Forschungspartner, während Sauerbruch Hutton die architektonische Planung verantwortete und seine Expertise über alle Projektphasen hinweg einbrachte. Der Industrieverband Lehmbaustoffe und der Landesbeirat Holz Berlin-Brandenburg begleiteten das Vorhaben fachlich und unterstützten

den Transfer der Forschungsergebnisse.

Der Reallabor-Ansatz diente somit als methodischer Rahmen und machte sichtbar, welche Potenziale regenerative Bauweisen unter realen Anwendungsbedingungen entfalten und welche technischen, organisatorischen und regulatorischen Voraussetzungen für ihre Übertragbarkeit und breitere Anwendung erforderlich sind.

2.2 Materialstrategie

Die Materialstrategie wurde bereits vor Beginn des Forschungsprojekts festgelegt. Ihr Schwerpunkt liegt auf drei komplementären Hauptmaterialien: Holz als nachwachsender Kohlenstoffspeicher, unstabilisierter Lehm als mineralischer und vollständig rückführbarer Baustoff sowie direkt wiederverwendeter Beton aus dem Bestand. Ergänzt werden diese durch weitere biobasierte Materialien wie Stroh, Zellulose und Materialien aus Paludikultur. Entscheidend für eine wirksame Bauwende sind dabei nicht allein die Materialwahl, sondern ebenso die regionale Verfügbarkeit, die Einbindung in bestehende Produktions- und Bauprozesse sowie die materialgerechte Kombination innerhalb der Konstruktion. Im bioregionalen Kontext Berlin-Brandenburgs wurde diese übergeordnete Materialstrategie in drei projektspezifische Stoffströme übersetzt: märkische Kiefer, industriell gefertigte Lehmsteine und direkt vor Ort wiederverwendeter Bestandsbeton.

Rund 70 % des Waldes in Brandenburg bestehen aus märkischer Kiefer. Der Waldumbau zu klimaresilienteren Mischbeständen verändert langfristig die Zusammensetzung dieser Wälder, zugleich steht aus den bestehenden Kiefernbeständen weiterhin ein erhebliches regionales Rohstoffpotenzial zur Verfügung [MLEUV25]. Das Werk von B&O Bau in Frankfurt (Oder) verarbeitet märkische Kiefer aus regionaler nachhaltiger Forstwirtschaft zu seriell vorgefertigten Holzelementen.

Lehm ist einer der ältesten Baustoffe der Menschheit und zugleich eine häufig unterschätzte Ressource. Er ist nahezu überall verfügbar und bietet mit seinen konstruktiven, bauphysikalischen und ökologischen Eigenschaften ein enormes Potenzial für zeitgenössische Bauweisen. Unstabilisierte Lehmsteine verhalten sich konstruktiv ähnlich wie gebrannte Ziegel, sind nach dem Rückbau ohne Qualitätsverlust wiederverwendbar und ermöglichen eine enorme Reduktion der materialgebundenen CO_2e-Emissionen durch den Verzicht eines Brennvorgangs. Zudem lässt sich die Herstellung von Lehmsteinen in bestehende Infrastrukturen der Ziegelindustrie integrieren – im Projekt konnte hierfür an die industrielle Lehmsteinproduktion der Ziegelei August Lücking angeknüpft werden. Eine Skalierung ist dadurch ohne grundlegende Umstrukturierung bestehender Fertigungsprozesse möglich.

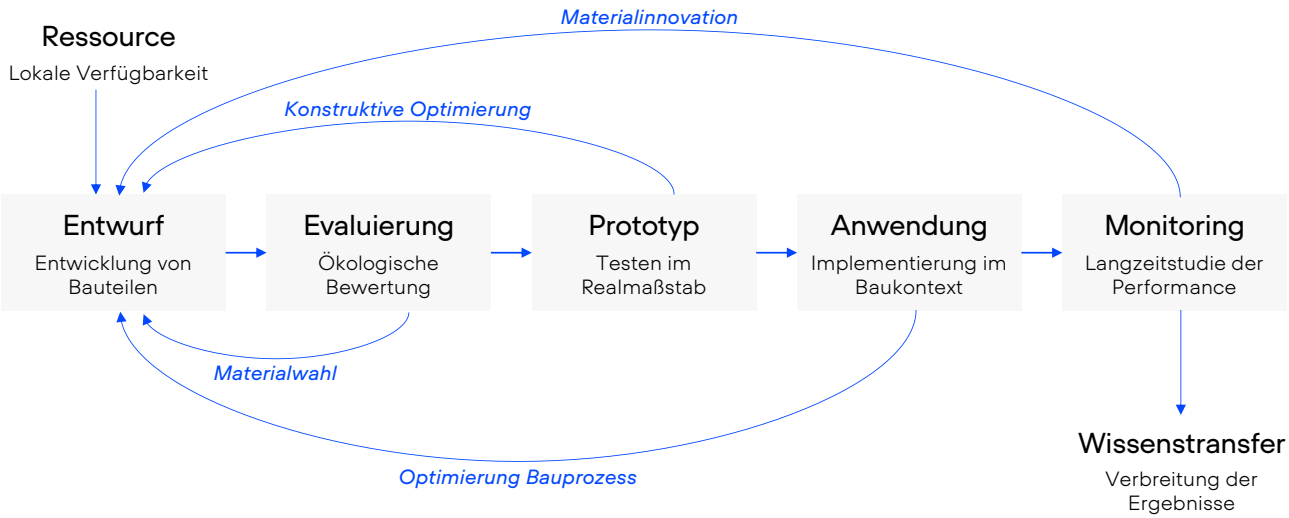
Die Wiederverwendung von Beton folgt einer anderen Logik. Angesichts der wachsenden anthropogenen Masse ist die Rückführung von Bauteilen in den Kreislauf perspektivisch unumgänglich [Elh20]. Im Kontext des Bauvorhabens bot der im Zuge der Entsiegelung vorgesehene Rückbau von Betonflächen auf dem Grundstück und im Gebäudebestand die Möglichkeit, das Material direkt vor Ort zu gewinnen und weiterzuverwenden.

2.3 Methodik einer projektbegleitenden Forschung

Die methodische Grundlogik des Holz-Lehm-Hybrid Projekts war als projektbegleitender, iterativer Forschungsprozess angelegt. Die Entwicklung der Bauteile folgte keinem linearen Ablauf, sondern war durch wiederkehrende Rückkopplungen zwischen Entwurf, Bewertung, Erprobung, Umsetzung und Beobachtung geprägt. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, Forschung als aktiven Bestandteil des Planungs- und Bauprozesses einzusetzen.

Ausgangspunkt bildeten Bauteilkonzepte, die konstruktiv ausgearbeitet und schrittweise überprüft wurden. Bereits in frühen Entwicklungsphasen wurden ökologische Bewertungen ausgewertet, um Varianten vergleichend einzuordnen und potenzielle Umweltwirkungen frühzeitig sichtbar zu machen. Die Bewertung diente damit nicht allein der Dokumentation, sondern unterstützte die Auswahl der Aufbaumaterialien und Weiterentwicklung der konstruktiven Ansätze. Die Bauteile wurden anschließend prototypisch erprobt und im Hinblick auf technische, fertigungsspezifische und bauliche Anforderungen weiter präzisiert. Erkenntnisse aus diesen Erprobungen flossen in die weitere Planung zurück und führten bei Bedarf zu Anpassungen von Materialwahl oder Konstruktionsdetails. Die Umsetzung im Bauprojekt bildete einen weiteren methodischen Prüfpunkt, an dem sich die entwickelten Lösungen unter realen Bedingungen bewähren mussten. Parallel zur baulichen Umsetzung wurde ein Monitoring vorbereitet, um das Verhalten ausgewählter Bauteile im Betrieb untersuchen zu können. Damit wurde die projektbegleitende Forschung über die Planungs- und Bauphase hinaus angelegt und eine Grundlage für die spätere Bewertung der Bauteile unter realen Nutzungsbedingungen geschaffen. Ergänzend wurden die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse fortlaufend dokumentiert und für unterschiedliche Kommunikations- und Transferformate aufbereitet. Die Verbreitung der Ergebnisse wurde als wesentlicher Bestandteil der projektbegleitenden Forschung und als wichtiges Instrument für die weitere Anwendung der entwickelten Ansätze verstanden.

Abb. 4:
Projektmethodik. Quelle: Eigene Darstellung (Bauhaus Erde).



2.4 Struktur der Arbeitspakete

Die inhaltliche Organisation erfolgte entlang von drei Arbeitspaketen, die nicht als streng aufeinanderfolgende Phasen angelegt, sondern größtenteils zeitlich und inhaltlich miteinander verknüpft waren.

Das erste Arbeitspaket fokussierte die Entwicklung, ökologische Bewertung, Erprobung und Optimierung der zuvor identifizierten Bauteile. Im Mittelpunkt standen tragende Bauteile des Hochbaus, deren Materialeinsatz einen wesentlichen Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz von Gebäuden hat. Neben der konstruktiven Entwicklung wurden ökologische, technische und zirkuläre Eigenschaften systematisch untersucht und in die Entwurfsphase integriert.

Das zweite Arbeitspaket widmete sich der Vorbereitung und schrittweisen Umsetzung des Monitorings. Aufbauend auf den realisierten Bauteilen wurde ein Messkonzept entwickelt, um deren Leistungsfähigkeit und Verhalten während der baulichen Umsetzung und anschließend unter realen Nutzungsbedingungen zu untersuchen. Dabei standen Fragestellungen zur funktionalen Sicherheit und zum bauphysikalischen und statischen Bauteilverhalten, zur baubiologischen und gesundheitlichen Qualität sowie zur operativen Energieeffizienz im Vordergrund.

Das dritte Arbeitspaket umfasste die Projektkommunikation sowie die Verbreitung der Forschungsergebnisse. Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Dokumentation der Prozesse, die Aufbereitung der Ergebnisse und deren Vermittlung an unterschiedliche Zielgruppen aus Praxis, Forschung und Öffentlichkeit.

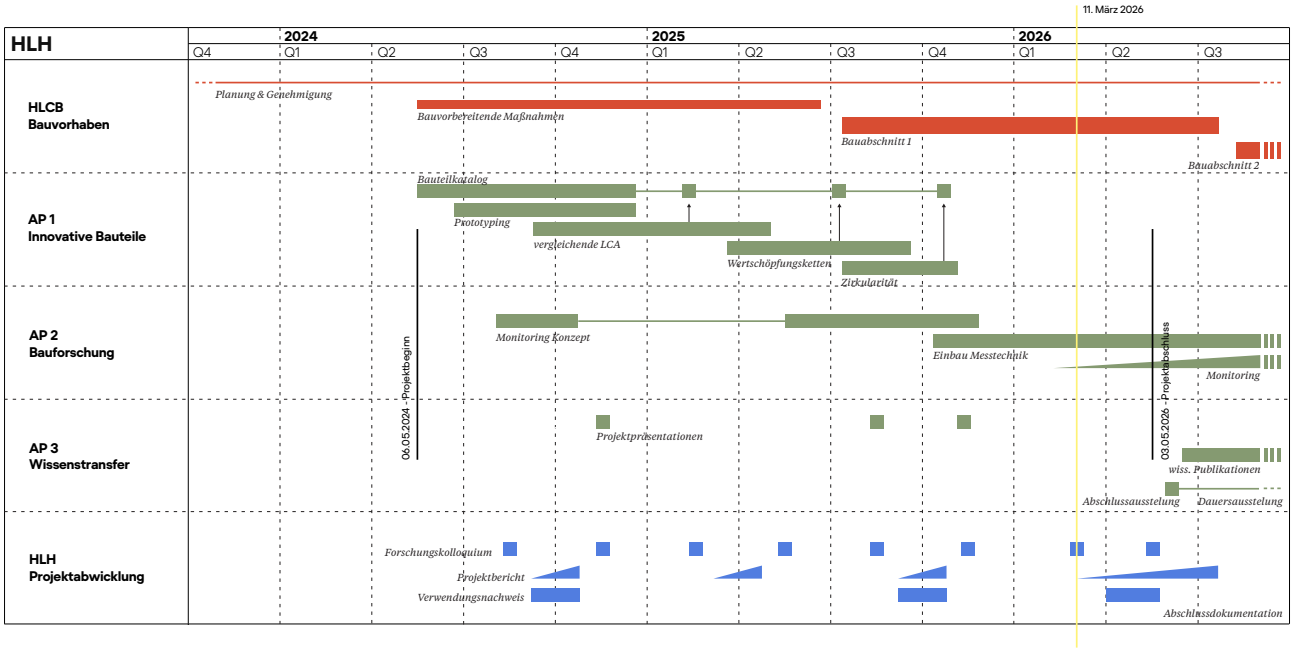


Abb. 5:
Darstellung des Projektverlaufs.
Quelle: Eigene Darstellung (Bauhaus Erde).

2.5 Arbeitspaket 1: Entwicklung innovativer Bauteile

2.5.1 Identifizierung relevanter Bauteile

Ausgangspunkt der Bauteilentwicklung war die Identifizierung jener Konstruktionen, die einen besonders hohen Einfluss auf die materialgebundenen Treibhausgasemissionen eines Gebäudes haben. Der Fokus lag auf den tragenden Bauteilen des Hochbaus, da diese in konventionellen Bauweisen häufig aus emissionsintensiven mineralischen Baustoffen ausgeführt werden.

Identifiziert wurden fünf Bauteile mit besonderem ökologischem Wirkungspotenzial: Fundamente, Bodenplatte, tragende Innenwände, Gebäudeabschlusswand und Geschossdecke. Um ihre Übertragbarkeit auf zukünftige Bauvorhaben zu erhöhen, wurden sie auf Bauteilebene unabhängig voneinander analysiert und systematisch katalogisiert. Dadurch konnten Anforderungen, Randbedingungen und Entwicklungspotenziale vergleichbar erfasst und für weitere Anwendungen aufbereitet werden.

2.5.2 Initialer Bauteilentwurf

Für die identifizierten Bauteile wurden Entwurfsansätze entwickelt, die direkt an die zuvor festgelegte Materialstrategie anknüpfen und Holz, Lehm sowie wiederverwendete Betonelemente in konstruktive Bauteilkonzepte übersetzten. Der Entwurf berücksichtigte konstruktive Anforderungen, ökologische Zielsetzungen, regionale Verfügbarkeit, Herstellbarkeit, Vorfertigung und Ausführbarkeit. Auch die technische Baubarkeit, baurechtliche Zulassungen und geltende Regelwerke wurden in dieser Phase einbezogen, da die entwickelten Bauteile als reproduzierbare und genehmigungsfähige Referenzen angelegt worden sind.

Diese initialen Bauteilaufbauten bildeten die Grundlage für die weitere Bewertung, Erprobung und Ausarbeitung. Sie wurden im Projektverlauf kontinuierlich analysiert, erprobt und weiterentwickelt.

2.5.3 Ökologische Bewertung als Entwurfsinstrument

Die ökologische Bewertung wurde als zentrales Instrument der Bauteilentwicklung eingesetzt und diente dazu, Entwurfsvarianten frühzeitig hinsichtlich ihrer Umweltwirkung einzuordnen, vergleichbar zu machen und daraus Grundlagen für konstruktive und materialbezogene Entscheidungen abzuleiten. Die Betrachtung erfolgte bewusst auf Bauteilebene und damit zunächst unabhängig von der spezifischen Gebäudekonfiguration. Dadurch konnten die entwickelten Konstruktionen als funktional definierte Systeme mit konventionellen Äquivalenten verglichen und die Auswirkungen einzelner Entscheidungen zu Materialwahl, Aufbau und Fügung unmittelbar nachvollzogen werden. Zugleich erhöht diese Abstraktion die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude und Typologien.

Neben einer bauteilbezogenen vergleichenden Lebenszyklusanalyse wurden zusätzlich Indikatoren zu Transportemissionen und Zirkularität analysiert, um die Umweltwirkungen umfassender abzubilden. Diese Faktoren sind für regenerative Bauweisen wesentlich, da Herkunft, Materialmenge, Transportaufwand, Rückbaubarkeit, werkstoffliche Trennbarkeit und Wiederverwendungspotenzial die ökologische Qualität einer Konstruktion maßgeblich beeinflussen.

Ergänzend wurden mögliche zukünftige Optimierungen der Bauteile qualitativ untersucht. Die visionären Referenzbauteile knüpfen an die im HLH-Projekt entwickelten Lösungen an und dienten der kritischen Reflexion sowie der Identifikation weiterer Entwicklungspotenziale. Die Zukunftsszenarien wurden qualitativ beschrieben und nicht in die normbezogene vergleichende Lebenszyklusanalyse einbezogen. Ziel der erweiterten Betrachtung war es, Anknüpfungspunkte für eine Weiterentwicklung zu schaffen und zugleich auf bestehende systemische Barrieren hinzuweisen, die einer breiten Umsetzung dieser Konzepte derzeit noch entgegenstehen.

Vergleichende Lebenszyklusanalyse

Ein zentrales Element der Bewertung bildete die ökobilanzielle Betrachtung auf Bauteilebene. Für die entwickelten Entwurfsvarianten wurden vergleichende Lebenszyklusanalysen durchgeführt und konventionellen, funktional äquivalenten Referenzbauteilen gemäß DIN EN 15643:2021-12 [DIN15643] gegenübergestellt. Dadurch konnten die entwickelten Konstruktionen im Vergleich zu etablierten konventionellen Bauweisen bewertet werden.

Als zentrale Bewertungsgröße wurde das gesamte Treibhausgaspotenzial (GWP-total) herangezogen, angegeben in kg CO_2e pro Quadratmeter Bauteilfläche. Die Bilanzierung der biogenen Kohlenstoffströme (GWP-biogenic) erfolgte entsprechend der in den verwendeten Datensätzen nach DIN EN 15804+A2 [DIN15804] abgebildeten –1/+1-Systematik. Diese Methode ermöglicht es, die biogene Kohlenstoffspeicherung und ihre spätere Freisetzung getrennt auszuweisen und die bilanzierten Emissionsbeiträge sowie Speicherwirkungen der eingesetzten Materialien nachvollziehbar darzustellen. Für die vergleichende Bewertung wurde ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt.

Die analysierten Lebenszyklusphasen umfassten die Module A1–A3, B4 sowie C3 und C4 [DIN15978]. Berücksichtigt wurden damit Rohstoffgewinnung, Transport und Herstellung, Ersatz während der Nutzungsdauer sowie Abfallbehandlung und Deponierung. Diese Systemgrenze bildet den Lebenszyklus der eingesetzten Materialien ab und erlaubt es, die Bilanzierung als Entwurfswerkzeug und nicht nur als nachgelagerte Dokumentation zu verwenden. Die Bilanzierung erfolgte mit eLCA, Version 0.9.7 [ELCA], auf Grundlage der Ökobaudat 2024_A2 [OEK] und unter Verwendung von Datensätzen gemäß DIN EN 15804+A2 [DIN15804]. Teilweise wurde auf generischen Datensätzen zurückgegriffen, da für spezifische, im Projekt verwendete Produkte keine produktbezogenen Umweltdeklarationen verfügbar waren. Die LCA bildet damit eine vergleichbare und normbezogene Grundlage für die Bewertung der Bauteile und ermöglicht eine belastbare vergleichende Einordnung der entwickelten Konstruktionen auf Basis der verfügbaren Datengrundlage.

Die Bauteile wurden schichtweise analysiert, um Materialanteile, konstruktive Aufbauten und deren jeweilige Beiträge zur Gesamtbilanz abbilden zu können. Für jedes der fünf Bauteile wurde das GWP-total je Quadratmeter Bauteilfläche ermittelt, anschließend wurden die bauteilbezogenen Werte der HLH-Konstruktionen und der konventionellen funktionalen Äquivalente jeweils summiert. Aus dem Verhältnis beider Summen wurde die prozentuale Minderung berechnet. Die resultierende Kennzahl dient der

bauteilübergreifenden vergleichenden Einordnung und stellt keine flächengewichtete Gesamtbilanz des Gebäudes dar.

Regionalität und Transportemissionen

Transportemissionen sind grundsätzlich Bestandteil der Lebenszyklusanalyse, werden dort jedoch häufig aggregiert innerhalb der A-Module und auf Basis generischer Datensätze abgebildet. Um den projektspezifischen Transportanteil genauer einzuordnen, wurden die Transportemissionen daher ergänzend anhand der tatsächlich verwendeten Materialien, Materialmengen und Transportstrecken vertiefend untersucht.

Die Analyse bezog sich auf die realen Materialherkünfte und Transportdistanzen der wesentlichen Primärmaterialien, das heißt jener Bauteilschichten, die aufgrund ihrer Mengenanteile und materialspezifischen Masse den größten Einfluss auf die transportbedingten Emissionen der jeweiligen Bauteile haben. Erfasst wurden Materialmengen, Rohdichten, Transportwege und die daraus resultierenden transportbedingten Treibhausgasemissionen in kg CO_2e pro Quadratmeter Bauteilfläche. Betrachtet wurden grundsätzlich die Module A2 und A4. Für die konstruktiven Holzelemente wurde ergänzend der vorgelagerte Transport des Rundholzes vom Forst zum Sägewerk berücksichtigt und projektspezifisch als A1b ausgewiesen. A1b stellt keine eigenständige normative Lebenszyklusphase dar, sondern eine Untergliederung des Moduls A1. Damit konnten Rohstofftransporte, Transporte zwischen Verarbeitungsschritten sowie Transporte zur Baustelle differenzierter abgebildet werden, als dies innerhalb der generischen LCA-Datensätze möglich gewesen wäre.

Die Berechnung erfolgte auf Grundlage des UBA-Teilgutachtens Carbon Footprint – Monitoring für den CO_2-Ausstoß in der Logistikkette [SK12] auf Well-to-Wheels-Basis. Da Transportprozesse in den verwendeten Ökobilanzdatensätzen bereits teilweise enthalten sind, wurden die projektspezifisch ermittelten Werte nicht zusätzlich zum GWP-total addiert, sondern ihr rechnerisches Verhältnis zum GWP-total als vergleichende Kennzahl herangezogen. Dadurch wurde sichtbar, in welchem Verhältnis Transportdistanz, Materialmenge und Materialwirkung zueinanderstehen und bei welchen Materialien Herkunft und Transportwege einen besonders relevanten Einfluss auf die Umweltwirkung haben.

Zirkularität

Die Zirkularitätsbewertung ergänzte die emissionsbezogene Betrachtung um eine ressourcenorientierte Perspektive, in der unterschiedliche Bauteil- und Materialeigenschaften über den gesamten Lebenszyklus hinweg berücksichtigt wurden. Der Einsatz wiederverwendeter oder erneuerbarer Baustoffe ist dabei ebenso relevant wie eine kreislauffähige Bauteilfügung, die einen späteren Rückbau, die Trennung der Materialien und deren erneuten Einsatz ermöglicht.

Grundlage der Methodik bildeten die Zirkularitätsbewertung des DGNB-Gebäuderessourcenpasses [DGNB23], der Circularity Performance Index (CPX) von Concular [CPX], sowie die Grundsätze der ISO 20887:2020 [ISO20887] und die Indikatoren des europäischen Referenzrahmens Level(s) [LEVELS]. Die darin weitgehend übereinstimmenden Anforderungen an Zirkularität wurden in eine projektspezifische Bewertungsmatrix übersetzt.

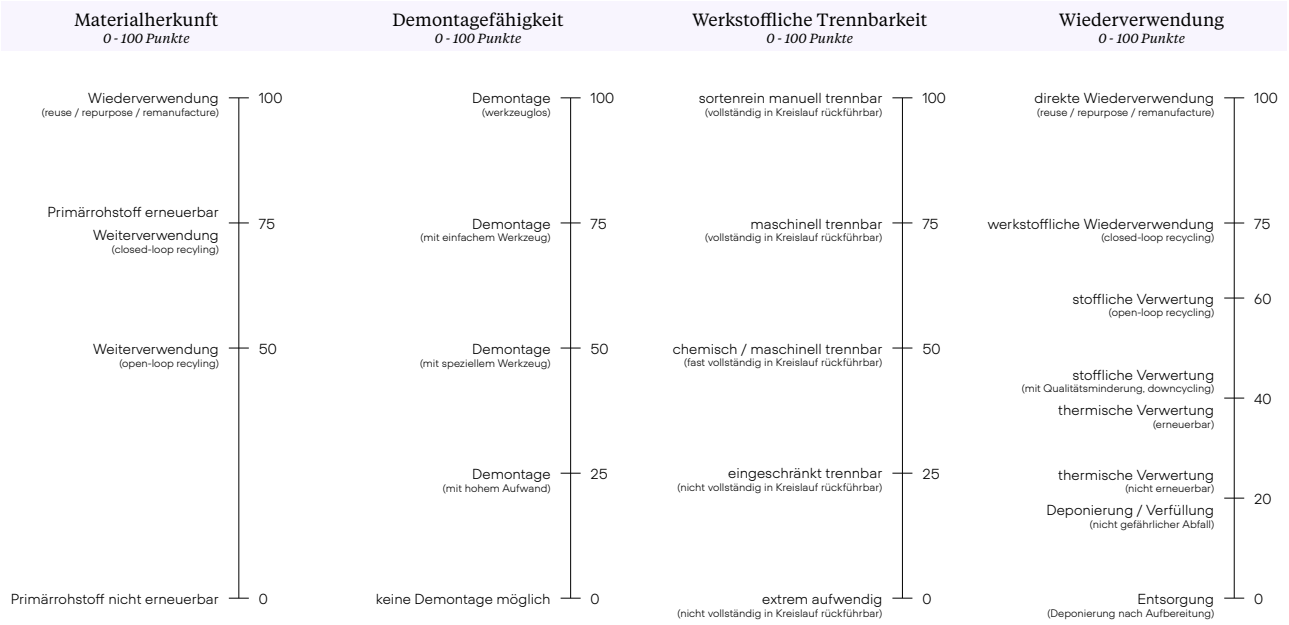


Abb. 6:
Bewertungsmatrix zur Zirkularität. Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.

Bewertet wurden Materialherkunft, Demontagefähigkeit, werkstoffliche Trennbarkeit und Wiederverwendungspotenzial der eingesetzten Materialien und Konstruktionen. Die Bewertung erfolgte quantitativ anhand eines Punktesystems von 0 bis 100 Punkten, wobei 100 Punkte jeweils das höchste Maß an Zirkularität darstellen. Hohe Punkte wurden insbesondere für wiederverwendete Materialien oder erneuerbare Primärrohstoffe, lösbare Verbindungen, eine zerstörungsarme Demontage, sortenreine Trennbarkeit sowie eine direkte Wiederverwendung vergeben, wobei niedrige Punktwerte für den Einsatz nicht erneuerbarer Primärrohstoffe, irreversible Verbundsysteme, einen hohen Trenn- oder Rückbauaufwand sowie geringe Potenziale für eine erneute Nutzung oder hochwertige stoffliche Verwertung vergeben wurden.

Der jeweilige Volumenanteil der einzelnen Materialien innerhalb eines Bauteils wurde in der Bewertung berücksichtigt, der vergebene Punktwert wurde entsprechend seines Anteils am gesamten Bauteil gewichtet. Aus der Summe der gewichteten Einzelbewertungen ergibt sich für jedes Bauteil somit ein Wert je Zirkularitätsaspekt. Die vier Teilbewertungen wurden sowohl getrennt ausgewiesen als auch zu einer übergeordneten Gesamtbewertung zusammengeführt. Die so ermittelten Gesamtwerte der Bauteile wurden anschließend mit den konventionellen funktionalen Äquivalenten verglichen. Diese Bewertung erweiterte damit die ursprünglich vorgesehene Betrachtung der Rückbaufähigkeit zu einer umfassenderen Bewertung kreislauffähiger Bauweisen, in der neben der Demontierbarkeit auch Materialherkunft, Trennbarkeit, Verwertung und Wiederverwendung systematisch in die Bauteilentwicklung einbezogen wurden.

2.5.4 Prototyping

Auf Grundlage der bewertungsgeleiteten Entwurfsentwicklung wurden ausgewählte Bauteilvarianten in mehreren Erprobungsphasen weiter ausgearbeitet. Ziel dieser Phase war es, die entwickelten Konstruktionen unter praxisnahen Bedingungen zu überprüfen und konstruktiv zu präzisieren. Die Prototypen dienten der Überprüfung von Tragfähigkeit, Maßhaltigkeit, Verarbeitbarkeit, Robustheit und Montagefähigkeit. Gleichzeitig ermöglichten sie eine Einschätzung der industriellen Fertigbarkeit sowie der Integration in

bestehende Bauabläufe. Erkenntnisse aus den Versuchsaufbauten führten in mehreren Fällen zu Anpassungen der Geometrie, der Materialkombinationen oder der konstruktiven Details.

Das Prototyping stellte damit eine zentrale Rückkopplungsschleife im Entwicklungsprozess dar und bildete die Schnittstelle zwischen Entwurf und baulicher Realisierung.

2.5.5 Umsetzung im Bauprojekt

Die final entwickelten Bauteilvarianten wurden in das Bauprojekt überführt und in den realen Bauablauf eingebunden. Die Umsetzung auf der Baustelle diente der Überprüfung von Ausführbarkeit, Montage, Schnittstellenkoordination und Kompatibilität mit angrenzenden Bauteilen und Gewerken. Sie ermöglichte zudem die Validierung der entwickelten Ansätze unter realen Anwendungsbedingungen und bildete damit einen weiteren methodischen Prüfpunkt innerhalb der projektbegleitenden Forschung.

2.5.6 Ökonomische, technologische und regulatorische Einordnung

Die entwickelten Bauteile wurden über ihre ökologische Bewertung hinaus technologisch, ökonomisch und regulatorisch eingeordnet. Im Mittelpunkt stand die Frage, unter welchen Bedingungen sich die Lösungen praktisch umsetzen und auf weitere Bauvorhaben übertragen lassen. Dabei wurde auch untersucht, inwieweit sie mit etablierten Bauweisen, Produktionsprozessen und Kompetenzstrukturen von B&O Bau kombiniert werden können.

Die technologische Betrachtung bezog sich auf den Entwicklungsstand der Konstruktionen, ihre Herstellbarkeit, die Anforderungen an Vorfertigung und Montage sowie ihre Einbindung in etablierte Planungs- und Bauabläufe. Untersucht wurde außerdem, inwieweit vorhandene Produktions- und Ausführungsstrukturen genutzt oder für die entwickelten Lösungen angepasst werden mussten. Die ökonomische Einordnung stützte sich auf verfügbare Kostenkennwerte und die im Projekt dokumentierten Aufwände für Materialprüfung, Planung, Prototyping, Produktionsanpassung, Logistik und bauliche Umsetzung. Da nicht für alle Bauteile vollständige quantitative Kostenanalysen vorlagen, erfolgte die Bewertung teilweise qualitativ. Dabei wurde zwischen bauteilbedingten Aufwänden und solchen unterschieden, die aus der erstmaligen Entwicklung, Erprobung und Umsetzung unter Forschungsbedingungen resultierten. Ergänzend wurde betrachtet, welche dieser Aufwände bei wiederholter Anwendung, zunehmender Standardisierung oder der Integration in reguläre Produktionsabläufe reduziert werden könnten. Aufgrund des Forschungscharakters des Vorhabens und der Nutzung bestehender Projekt- und Partnerstrukturen diente die ökonomische Betrachtung einer orientierenden Einordnung und nicht einer vollständigen Wirtschaftlichkeitsbewertung. Die regulatorische Betrachtung untersuchte, inwieweit die Konstruktionen innerhalb bestehender Normen und bauordnungsrechtlicher Anforderungen realisiert werden konnten. Berücksichtigt wurden erforderliche Material- und Bauteilnachweise, brandschutztechnische Anforderungen und projektspezifische Abweichungen. Auf dieser Grundlage wurde eingeordnet, welche Regelwerke die Anwendung regenerativer und kreislauffähiger Bauweisen bereits ermöglichen und wo für eine breitere Umsetzung weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

2.6 Arbeitspaket 2: Bauforschung und Monitoring

Das zweite Arbeitspaket umfasste die Entwicklung, Vorbereitung und schrittweise Umsetzung eines bauteilbezogenen Monitorings. Aufbauend auf den realisierten Konstruktionen sollen Planungsannahmen durch In-situ-Messungen überprüft und Daten zum Verhalten der Bauteile unter realen Umgebungs- und Nutzungsbedingungen gewonnen werden. Die Vorbereitung und Installation der Messtechnik erfolgte teilweise während der Bauphase, wobei die kontinuierliche Erfassung und Auswertung der Messungen überwiegend für den Gebäudebetrieb vorgesehen ist.

Untersucht werden die funktionale Sicherheit und bauphysikalische Leistungsfähigkeit der Bauteile, ihre baubiologische und innenraumklimatische Qualität sowie die Energieeffizienz und Umweltwirkung des Gebäudes im Betrieb.

Ergänzende Darstellungen zur Messstrategie, zur Verortung der Sensorik und zum Zeitplan des Monitorings sind in Anhang C zusammengestellt.

2.6.1 Monitoringkonzept

Das Monitoringkonzept verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz und gliedert sich in drei thematische Schwerpunkte: funktionale Sicherheit und Bauteilverhalten, baubiologische und innenraumklimatische Qualität sowie Energieeffizienz und Umweltwirkung. Die Messstrategie wurde so ausgelegt, dass sowohl kurzfristige Reaktionen der Bauteile auf wechselnde Umweltbedingungen als auch längerfristige Entwicklungen erfasst werden können.

Funktionale Sicherheit und Bauteilverhalten

Der erste Schwerpunkt umfasst die konstruktive und bauphysikalische Zuverlässigkeit der entwickelten Bauteile. Untersucht werden insbesondere mögliche Feuchteeinträge in außenliegenden Holzbauteilen und in den angrenzenden Außen- und Innenbereichen sowie die strukturelle Integrität und Formstabilität der Re-Use-Fundamente.

Für die Holz-Bodenplatte und die Holz-Gebäudeabschlusswand sind Feuchtedetektoren vorgesehen, die kritische Feuchtezustände frühzeitig anzeigen sollen. Ergänzende Messungen im Kriechkeller und in der Gebäudefuge ermöglichen es, mögliche Feuchtebeanspruchungen mit den jeweiligen Umgebungsbedingungen in Beziehung zu setzen.

Die funktionale Sicherheit der Re-Use-Fundamente wird dagegen nicht durch eine kontinuierliche Sensorik, sondern primär durch die materialtechnische und statische Qualifizierung des wiederverwendeten Bestandsbetons bewertet. Dazu gehören die visuelle und geometrische Erfassung der Betonplatten, die Entnahme und Prüfung von Bohrkernen sowie die statische Bemessung der daraus entwickelten Fundamentkörper. Diese Nachweise bilden die Grundlage für die Beurteilung ihrer Tragfähigkeit und Eignung für die vorgesehene Wiederverwendung.

Baubiologische und innenraumklimatische Qualität

Der zweite Schwerpunkt untersucht die Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Materialien und der Qualität der Innenräume. Erfasst werden die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchte, die CO_2-Konzentration in der Raumluft und die Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen

(VOCs). Die Messungen dienen der Bewertung der Raumluftqualität und der Frage, wie sich die sichtbaren Kiefernholz-Oberflächen sowie die großflächig eingesetzten Lehmbaustoffe auf gesundheits- und komfortbezogene Innenraumparameter auswirken.

Zur Untersuchung der hygrothermischen Wirkung der Lehmbauteile sollen Temperatur- und Feuchteverläufe im tragenden Lehmsteinmauerwerk und in der Holz-Lehm-Hybriddecke erfasst werden. Im Lehmsteinmauerwerk sind hierfür an zwei Messpunkten (Foyer und Gemeinschaftsraum), jeweils fünf digitale Feuchte- und Temperatursensoren in unterschiedlichen Messtiefen innerhalb des Mauerwerks vorgesehen. Diese gestufte Anordnung erfasst sowohl die oberflächennahen Bereiche, in denen aufgrund der direkten Exposition zum Raumklima stärkere Schwankungen erwartet werden, als auch die tieferen Wandschichten, in denen ein stabileres Verhalten angenommen wird. Die Sensorik wird so angeordnet, dass Veränderungen innerhalb der Bauteile den jeweiligen Raumklimabedingungen zugeordnet werden können. Damit sollen insbesondere die hygroskopische Feuchtepufferung und die thermische Speicherwirkung der massiven Lehmelemente untersucht werden.

Energieeffizienz und Umweltwirkung im Betrieb

Der dritte Schwerpunkt erweitert die materialbezogene Bewertung um die Nutzungsphase des Gebäudes. Hierzu werden der operative Energieverbrauch sowie Temperaturverläufe in ausgewählten Bauteilen und Innenräumen ausgewertet. Die gemessenen Energieverbrauchswerte werden konventionellen Referenzwerten vergleichbarer Gebäude gegenübergestellt, um mögliche Einflüsse der entwickelten Bauweisen auf den betrieblichen Energiebedarf und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen zu untersuchen. Die Auswertung der Temperaturprofile dient ergänzend dazu, das thermische Verhalten der Konstruktionen und den Beitrag der eingesetzten Materialien zur Regulierung des Innenraumklimas zu beurteilen. Ziel ist es, die betriebsbedingten Energie- und Emissionskennwerte mit den materialbezogenen Treibhausgasemissionen in Beziehung zu setzen und die ökologische Gesamtperformance der entwickelten Bauweisen über Herstellung und Nutzung hinweg einzuordnen.

2.6.2 Messstrategie und Verortung

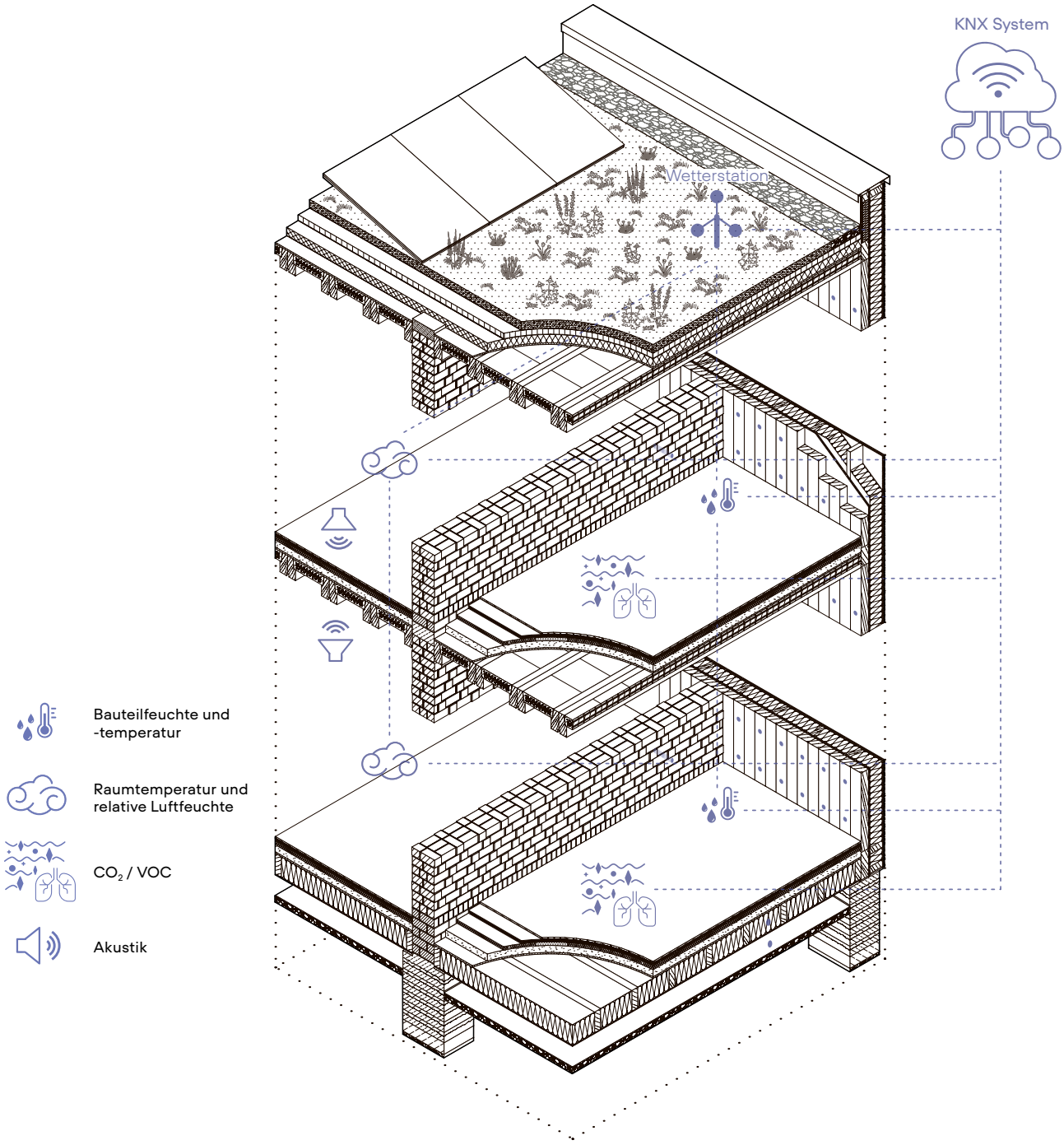
Die Messpunkte wurden bauteilbezogen im Grundriss und in den konstruktiven Schnitten verortet. Dadurch lassen sich die Messwerte eindeutig den untersuchten Konstruktionen, den angrenzenden Räumen und den jeweiligen Außenbedingungen zuordnen. Die Messstrategie umfasst Bauteilsensorik, Sensoren in Kriechkeller, Gebäudefuge sowie Messgeräte zur Erfassung von Raumklima und Raumluftqualität.

In der Holz-Bodenplatte und der Gebäudeabschlusswand wurden Feuchtedetektoren unterhalb der Bodenplatte sowie außenseitig im Bereich der Gebäudeabschlusswand angebracht. Ergänzende Sensoren erfassen die relative Luftfeuchte im Kriechkeller, in der Gebäudefuge und in den angrenzenden Innenräumen. Im tragenden Lehmsteinmauerwerk und in der Holz-Lehm-Hybriddecke sind digitale Feuchte- und Temperatursensoren in Bauteilmitte sowie, beim Mauerwerk, in fünf Messtiefen vorgesehen; die zugehörige Innenraumklimasensorik erfasst Temperatur und Feuchte in

unmittelbarer Nähe der jeweiligen Bauteilmessstellen. Raumseitig wird diese Sensorik durch Messungen von Temperatur, relativer Luftfeuchte, CO_2 und VOC ergänzt. Die Holz-Lehm-Hybriddecke wird darüber hinaus in ausgewählten übereinanderliegenden Räumen bauakustisch untersucht.

Die kontinuierlich erfassten Sensordaten werden über ein KNX-basiertes Gebäudeautomationssystem in einer zentralen Datenbank zusammengeführt. Punktuelle Erhebungen wie Schallmessungen oder Luftqualitätsanalysen werden ergänzend in die bauteil- und raumbezogene Auswertung einbezogen. Eine auf dem Dach installierte Wetterstation liefert ergänzend kontinuierliche Referenzwerte zu Außentemperatur, -feuchte und weiteren klimatischen Bedingungen und ermöglicht so die Einordnung der raumklimatischen Messwerte in den jahreszeitlichen und witterungsbedingten Kontext.

Abb. 7:
Monitoringkonzept.
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.



Die Messdaten werden bauteilbezogen ausgewertet und mit den jeweiligen Raum- und Außenklimabedingungen abgeglichen. Kurzfristige Messungen und Funktionskontrollen dienen zunächst der Inbetriebnahme und der Identifikation möglicher Auffälligkeiten. Aussagen zu saisonalen Feuchte- und Temperaturverläufen, zur thermischen Trägheit und zur langfristigen Innenraumqualität setzen eine kontinuierliche Erfassung über mehrere Nutzungs- und Jahreszyklen voraus.

2.6.3 Zeitliche Umsetzung

Die Umsetzung des Monitorings erfolgt gestuft. Messungen, die unabhängig vom luftdichten Gebäudeabschluss und vom regulären Gebäudebetrieb durchgeführt werden können, wurden bereits während der Bau- und Fertigstellungsphase begonnen. Raumklimatische, energetische und nutzungsbezogene Untersuchungen werden nach Fertigstellung der luftdichten Gebäudehülle und der Inbetriebnahme des Gebäudes durchgeführt.

Diese zeitliche Staffelung wurde bereits in der Konzeption berücksichtigt. Innerhalb der Projektlaufzeit standen daher die Installation und Inbetriebnahme der Sensorik, erste Funktionskontrollen sowie unmittelbar durchführbare Material- und Raumluftuntersuchungen im Vordergrund. Die kontinuierliche Auswertung der Messdaten über mehrere Jahreszeiten ist Gegenstand des anschließenden Langzeitmonitorings und bildet die Grundlage für belastbare Aussagen zum langfristigen Verhalten der entwickelten Konstruktionen unter realen Nutzungsbedingungen.

2.7 Arbeitspaket 3: Projektbegleitung und Kommunikation

Das dritte Arbeitspaket untersucht, wie die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse für unterschiedliche Zielgruppen aufbereitet, vermittelt und für zukünftige Anwendungen nutzbar gemacht werden können. Im Zentrum standen die Dokumentation, Kommunikation und der Transfer von Erfahrungen aus Planung, Forschung, Fertigung und Umsetzung regenerativer Bauweisen, um das Zusammenwirken von Umweltschutz und Baukultur einem breiten Publikum zu vermitteln.

2.7.1 Kommunikationsformate

Die Verbreitung der Projektergebnisse wurde als integraler Bestandteil des Forschungsvorhabens methodisch von Beginn an mitgedacht und begleitete das Vorhaben über die gesamte Projektlaufzeit. Ziel war es, die gewonnenen Erkenntnisse frühzeitig und kontinuierlich in unterschiedliche Fachöffentlichkeiten zu tragen.

Hierzu wurden verschiedene Kommunikationsformate eingesetzt, die sich an unterschiedliche Zielgruppen richteten. Dazu zählten Fachvorträge, Präsentationen im Rahmen von Veranstaltungen, Ausstellungen sowie schriftliche Veröffentlichungen. Die Auswahl der Formate orientierte sich an den jeweiligen Inhalten, dem Projektfortschritt sowie an den angesprochenen Zielgruppen. Diese dienten nicht nur der Ergebnisvermittlung, sondern auch der Dokumentation von Entwicklungs- und Umsetzungsprozessen sowie dem fachlichen Austausch mit relevanten Akteur*innen.

2.7.2 Transferstrategie

Die Transferstrategie zielte darauf ab, die Projektergebnisse über den unmittelbaren Projektkontext hinaus nutzbar zu machen. Im Fokus stand die Übertragbarkeit der entwickelten Bauweisen auf andere Bauvorhaben sowie die Weitergabe der gewonnenen Erkenntnisse an Akteur*innen aus Planung, Baupraxis, Forschung und Bildung.

Die Wissensvermittlung erfolgte sowohl über die Darstellung konkreter Bauteillösungen als auch über die Vermittlung der im Projekt erarbeiteten methodischen Ansätze,

insbesondere der iterativen Bauteilentwicklung und des Reallabor-Ansatzes. Dadurch wurden neben den konstruktiven Lösungen auch die damit verbundene Entwurfsstrategie, zukünftige Optimierungspotenziale und bestehende Herausforderungen dokumentiert und als Referenz für künftige Anwendungen aufbereitet.

2.7.3 Zielgruppen

Die Verbreitungs- und Transfermaßnahmen richteten sich an unterschiedliche Zielgruppen. Dazu zählten Fachplaner*innen, Architekt*innen, Ingenieur*innen, ausführende Betriebe, Bauherr*innen sowie Personen aus Forschung und Lehre. Darüber hinaus wurden auch die fachlich interessierte Öffentlichkeit und Nutzer*innen adressiert, um das Verständnis für regenerative und zirkuläre Bauweisen zu stärken.

Die zielgruppenspezifische Aufbereitung der Inhalte ermöglichte eine adressatengerechte Vermittlung der Projektergebnisse und unterstützte deren Einordnung, Diskussion und potenzielle Anwendung in unterschiedlichen Handlungsfeldern des Bauwesens.

3 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden fünf Bauteile entwickelt, bewertet, prototypisch erprobt und baulich umgesetzt: Re-Use-Fundamente, Holz-Bodenplatte, tragendes Lehmsteinmauerwerk, Holz-Gebäudeabschlusswand sowie Holz-Lehm-Hybriddecke. Die folgenden Ergebnisse dokumentieren die entwickelten Konstruktionen, ihre ökologische Bewertung, die Erfahrungen aus Prototyping und Umsetzung sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse für die Weiterentwicklung regenerativer und zirkulärer Bauweisen.

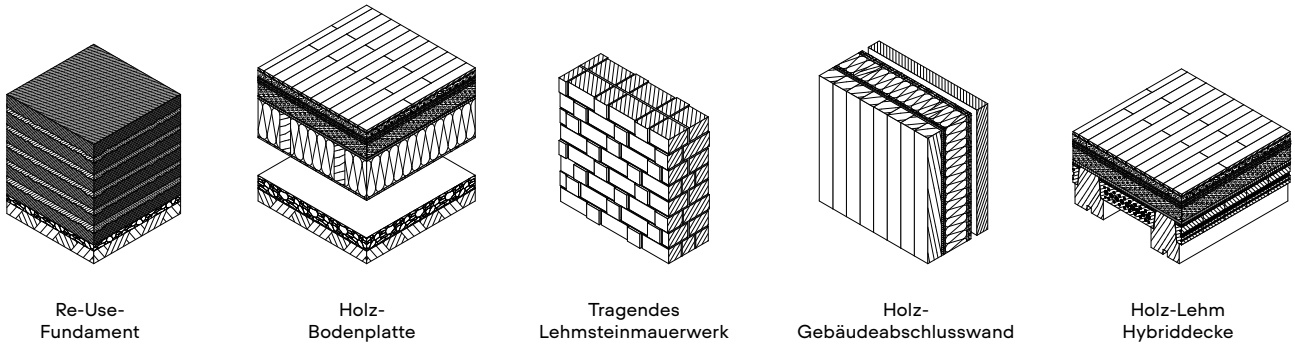


Abb. 8:
Fünf innovative Bauteile.
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.

3.1 Arbeitspaket 1: Entwicklung innovativer Bauteile

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 1 werden zunächst bauteilbezogen dargestellt und anschließend in Kapitel 3.1.6 bauteilübergreifend zusammengeführt. Neben den realisierten Konstruktionen werden Optimierungsperspektiven aufgezeigt, die im Projekt untersucht, aufgrund regulatorischer, produktspezifischer oder baulogistischer Rahmenbedingungen jedoch noch nicht umgesetzt werden konnten.

Ergänzende Darstellungen zur Entwicklung, ökologischen Bewertung, prototypischen Erprobung und baulichen Umsetzung der einzelnen Bauteile sind in Anhang A zusammengestellt. Anhang B beinhaltet die Berechnungsgrundlagen der ökologischen Bewertungen der Bauteile und ergänzt diese um Darstellungen zu Wertschöpfungsketten der Primärmaterialien und Bauteilfügungen.

3.1.1 Re-Use-Fundamente

Bauteilentwurf und Entwicklung

Die Re-Use-Fundamente wurden aus den vorhandenen Betonflächen der ehemaligen Remisenanlage und der befestigten Hofflächen auf dem Gelände der B&O Bau und Gebäudetechnik entwickelt. Die seit ca. 1880 gewachsene Bestandsstruktur war durch unterschiedliche Nutzungen, mehrere Umbauphasen und heterogene Materialqualitäten geprägt. Entsprechend bildete die Bestandsqualifizierung den Ausgangspunkt der Bauteilentwicklung. Die vorhandene Bodenplatte wurde als projektspezifisches Bauteillager erschlossen und nach Prüfung, Zuschnitt und statischer Zuordnung in neue gestapelte Punkt- und Streifenfundamente überführt. Damit wurde ein

ursprünglich für den Rückbau und Entsorgung vorgesehener Materialbestand als sekundäre Ressource für eine erneute tragende primäre Anwendung nutzbar gemacht.

Die Qualifizierung erfolgte zunächst über eine visuelle Beurteilung der Betonflächen, eine Zonierung der potenziell verwendbaren Bereiche und die Entnahme von sechs Bohrkernen. Die Entnahme und Prüfung dieser Bohrkerne erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12504-1 [DIN12504-1] und DIN EN 12390-3 [DIN12390-3]. Der Prüfbericht der Kiwa GmbH dokumentiert Aufbau, Bewehrungsgehalt, Korngrößenverteilung, Betongefüge, Verbund der Schichten, Verdichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Druckfestigkeit der entnommenen Proben. Die Bohrkerne BK1, BK2, BK3, BK5 und BK6 erreichten Druckfestigkeiten zwischen 60,4 und 75,1 N/mm². Der Bereich BK4 wurde aufgrund einer deutlich geringeren Druckfestigkeit von 10,1 N/mm² gemäß Gründungsstatik aus der Anwendung als Stapelfundament ausgenommen.

Die Druckfestigkeitsprüfung des Bestandsbetons ist in der technischen Anlage TA 01-1, die statische Bemessung der Re-Use-Fundamente in der technischen Anlage TA 01-2 dokumentiert.

Auf Grundlage dieser Materialprüfung wurden die geeigneten Bestandsflächen in die Gründungsplanung integriert. Die benötigten Plattenformate wurden angezeichnet, zugeschnitten, nummeriert, gelagert und den jeweiligen Fundamentpositionen zugeordnet. Daraus entstand ein projektspezifischer Fundamentkatalog, der die vorhandene Materialgeometrie mit den statischen Anforderungen der neuen Tragstruktur und den baulogistischen Bedingungen der Baustelle verknüpft. Die einzelnen Platten wurden entsprechend ihrer Abmessungen, Materialqualität und vorgesehenen Einbauposition systematisch erfasst und den jeweiligen Fundamenttypen zugeordnet.

Die ausgeführten Fundamente bestehen aus gestapelten Zuschnitten der Bestandsbodenplatte und wurden zu unbewehrten Stapelfundamenten gefügt. Mörtel- beziehungsweise Ausgleichsschichten zwischen den Plattenlagen dienen der ebenen Lagerung, dem Toleranzausgleich und der gleichmäßigen Lastübertragung im Fundamentkörper. Für die Zwischenschichten ist in der Gründungsstatik Mörtel C25/30 vorgesehen, ausgeführt wurde ein RC-Beton Typ 1 mit einem Recyclinganteil von 45 %. Die Gründung umfasst Einzel- und Streifenfundamente mit einer Mindesteinbindetiefe von jeweils 80 cm. Die Tragfähigkeit und Standsicherheit wurden durch die Druckfestigkeitsprüfung des Bestandsbetons sowie die statische Bemessung der Fundamenttypen mit bis zu acht Plattenlagen nachgewiesen.

Ökologische Bewertung

Die vergleichende Lebenszyklusanalyse weist für die Re-Use-Fundamente eine deutliche Reduktion der materialgebundenen Treibhausgasemissionen aus. Gegenüber dem konventionellen funktionalen Äquivalent sinkt der bilanzierte GWP-total-Wert von 273,5 auf 56,8 kg CO_2e/m². Dies entspricht einer Reduktion von rund 79 %. Maßgeblich für dieses Ergebnis ist die direkte Weiterverwendung des vorhandenen Bestandsbetons in tragender Funktion. Die Emissionen des Bauteils werden somit auf die Herstellung der erforderlichen Füge- und Ausgleichsschichten reduziert.

In der transportbezogenen Bewertung entstehen für den wiederverwendeten Bestandsbeton keine Transportemissionen, da Gewinnung, Zuschnitt, Lagerung und Wiedereinbau unmittelbar auf dem Grundstück erfolgten. Der

ökologische Vorteil des Bauteils liegt damit wesentlich in der standortgebundenen Wiederverwendung eines bereits vorhandenen Baustoffs und dem weitgehenden Verzicht auf neue Primärmaterialien für die Gründung.

Die Zirkularitätsbewertung ergibt 43,9 von 100 Punkten für die Re-Use-Fundamente und liegt damit über dem konventionellen funktionalen Äquivalent mit 28,2 Punkten. Besonders positiv wirkt sich die direkte Wiederverwendung vor Ort auf das Kriterium der Materialherkunft aus. Die Bewertung der Demontagefähigkeit, der werkstofflichen Trennbarkeit und des Wiederverwendungspotenzials fällt geringer aus, da Beton nach einer weiteren Nutzungsphase voraussichtlich überwiegend stofflich verwertet werden kann. Die bauteilhafte Wiederverwendung verlängert dennoch die konstruktive Nutzungsdauer des vorhandenen Materials und erhält dessen tragende Funktion über eine weitere Gebäudelebensphase.

Als visionäre Entwicklungsperspektive wurde eine abgetreppte Ausbildung der Fundamentkörper entwickelt. Eine solche Geometrie folgt dem Lastabtrag präziser und kann das eingesetzte Materialvolumen weiter reduzieren. Im realisierten Bauvorhaben blieb diese Variante als planerische Entwicklungsperspektive dokumentiert, da zusätzlicher Zuschnitt, weitergehende Kategorisierung und erhöhte Baustellenlogistik den Ausführungsprozess deutlich komplexer gemacht hätten und unter den gegebenen Projektbedingungen wirtschaftlich und logistisch nicht vertretbar gewesen wären. Durch eine gestufte Ausbildung der Fundamente ließe sich das Materialvolumen um bis zu 40 % reduzieren. Aus statischer Sicht lässt sich Material an den Kanten einsparen, da der Lastabtrag innerhalb des Druckverteilungswinkels von etwa 60° erfolgt. Außerhalb dieses Bereichs kann der nicht tragende Teil vollständig weggelassen werden.

Prototyping und bauliche Umsetzung

Die prototypische Entwicklung der Re-Use-Fundamente erfolgte unmittelbar auf der Baustelle. Im Zentrum standen die praktische Handhabung der zugeschnittenen Betonplatten, die Entwicklung geeigneter Hebe- und Versetzmethoden, die lagenweise Fügung der Elemente sowie die Herstellung eines ausreichend präzisen Höhenniveaus für die anschließenden Bauteile. Die Versuche bezogen sich damit auf die praktische Umsetzbarkeit des Stapelprinzips unter realen Baustellenbedingungen. Im Zuge der Umsetzung wurden aus der bestehenden Bodenplatte rund 645 Platten geschnitten. Etwa 580 Elemente konnten in der neuen Gründung eingesetzt werden. Daraus entstanden 169 laufende Meter Fundamentkörper in unterschiedlichen Höhen sowie 53 Einzelfundamente. Der Prozess umfasste das Anzeichnen des Zuschnittes, das Schneiden der Bestandsplatten, die Zwischenlagerung, die Zuordnung zum Fundamentkatalog und den lagenweisen Einbau im Baugrund.

Die Ausführung erforderte eine präzise Abstimmung zwischen Rückbau, Tragwerksplanung, Zuschnitt, Lagerung und Montage. Relevante Parameter waren Plattenhöhe, Zuschnittformat, Oberflächenqualität, Einbauposition, Lagerfläche und Anschluss an die darüberliegenden Bauteile. Die Heterogenität der Bestandsplatten und die projektspezifischen Einbausituationen führten zu erhöhtem Koordinations- und Anpassungsbedarf.

Im Verlauf der Ausführung wurden Arbeitsmittel, Hebetechnik und Versetzabfolge an die konkreten Baustellenbedingungen angepasst. Der

lagenweise Einbau und die abschließende Höhennivellierung ermöglichten es, die heterogenen Bestandsplatten in eine ausführbare Gründungsstruktur zu überführen.

Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologisch liegt das Ergebnis der Re-Use-Fundamente in der qualitätsgesicherten Überführung eines heterogenen Bestandsmaterials in ein statisch bemessenes und dauerhaft tragfähiges Gründungssystem. Der Fundamentkatalog bildete dabei das zentrale Instrument, um geprüfte Materialqualität, Zuschnittformat, Einbauposition und Fundamenttyp planerisch und baulogistisch zusammenzuführen.

Regulatorisch konnten die Re-Use-Fundamente im Rahmen der bestehenden baurechtlichen und statischen Nachweisführung umgesetzt werden. Die Gründungsstatik sieht Einzel- und Streifenfundamente mit einer Mindesteinbindetiefe von 80 cm vor und beschreibt deren Ausführung als Stapelfundamente aus den vor Ort vorhandenen, wiederzuverwendenden Betonplatten. Grundlage der Umsetzung waren die dokumentierten Druckfestigkeitsprüfungen des Bestandsbetons und die positionsbezogene statische Bemessung der Fundamenttypen.

Ökonomisch war eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Projektkosten mit konventionellen Gründungssystemen nur eingeschränkt möglich. Im Projekt führten die Re-Use-Fundamente trotz des zusätzlichen Aufwands für Bestandsuntersuchungen, Materialqualifizierung, Nachweisführung und Prozessentwicklung nicht zu signifikant höheren unmittelbaren Herstellungskosten gegenüber einer konventionellen Gründung. Maßgeblich hierfür waren die Verfügbarkeit geeigneter Materialbestände vor Ort, die Vermeidung von Material- und Transportkosten sowie die enge Zusammenarbeit der Projektbeteiligten. Der zusätzliche Aufwand verlagerte sich jedoch in erheblichem Maße auf Planung, Projektsteuerung, Bauleitung, Nachweisführung und Koordination. Insbesondere die Bestandsaufnahme, Materialbewertung, statische Zuordnung, Dokumentation der Bauteile sowie die Abstimmung zwischen Rückbau, Planung und Ausführung erforderten zusätzliche personelle Ressourcen und damit verbundene indirekte Projektkosten. Eine wesentliche Herausforderung bestand in der Identifikation geeigneter ausführender Unternehmen. Für die Wiederverwendung tragender Betonbauteile stehen bislang nur wenige Marktakteure mit entsprechenden Erfahrungen und Referenzen zur Verfügung. Die daraus resultierende Unsicherheit führte teilweise zu erhöhten Risikozuschlägen, zurückhaltender Angebotsabgabe oder dem Wunsch nach einer Ausführung auf Stundenlohnbasis.

Die wirtschaftliche Übertragbarkeit des Ansatzes setzt voraus, dass geeigneter Bestandsbeton am Standort verfügbar ist und die vorgesehene Bauaufgabe eine statisch nachweisbare Gründung aus den vorhandenen, unbewehrten Elementen ermöglicht.

3.1.2 Holz-Bodenplatte

Bauteilentwurf und Entwicklung

Die Holz-Bodenplatte wurde als unterlüftetes, seriell vorgefertigtes Bauteilsystem entwickelt. Die Konstruktion ersetzt die im Erdkontakt üblicherweise mineralisch ausgeführte Bodenplatte durch ein mehrschichtiges,

überwiegend biobasiertes Bauteilsystem aus Holz, Lehm und nachwachsenden Rohstoffen. Die Bodenplatte ist über einem belüfteten Kriechkeller angeordnet und dadurch konstruktiv vom Erdreich getrennt. Diese Ausbildung bildet die bauphysikalische Voraussetzung für den Einsatz von Holz im erdnahen Bereich. Sie gewährleistet die notwendige Luftzirkulation, schützt die Konstruktion vor direkter Erdberührung und ermöglicht zugleich die Kontrolle des Feuchteverhaltens sowie spätere Inspektions- und Wartungsarbeiten im Sinne des konstruktiven Holzschutzes nach DIN 68800-2 [DIN68800-2].

Die Holz-Bodenplatte gliedert sich in ein werkseitig vorgefertigtes Trag- und Dämmelement sowie den darauf ausgeführten Bodenaufbau. Das vorgefertigte Element besteht aus Gefachen aus Brettschichtholz-Kiefer, die mit Zellulose ausgeblasen und oberseitig durch eine Holzwerkstoffplatte mit 50 % Altholzanteil sowie eine Dampfbremse abgeschlossen werden. Unterseitig schützt eine zementgebundene, feuchteresistente Trockenbauplatte die Konstruktion gegenüber dem mechanisch belüfteten Kriechkeller. Der Bodenaufbau umfasst eine dreilagig verdichtete Holz-Lehm-Schüttung als Installationsebene, dreilagig angeordnete Holzweichfaserplatten unterschiedlicher Festigkeit, Lehmformplatten mit integrierter Fußbodenheizung sowie einen FNR-geförderten Eichendielenboden mit sichtbar belassenem Insektenschadbild. Die Dielen werden über Trapezleisten verdeckt verschraubt, die zugleich der Lagesicherung der Lehmformplatten dienen. Unterhalb der Bodenplatte schließen eine Auffüllung aus RC-Gesteinskörnung, eine PE-Folie und das Erdreich an. Der ursprünglich vorgesehene Kies wurde dabei DIN-konform durch Recyclingsplitt ersetzt, wodurch der Einsatz primärer mineralischer Rohstoffe zusätzlich reduziert werden konnte.

Ökologische Bewertung

Die vergleichende Lebenszyklusanalyse weist für die Holz-Bodenplatte eine Reduktion des GWP-total von 251,12 auf 38,52 kg CO_2e/m^2 aus, dies entspricht einer Minderung von rund 85 % gegenüber dem konventionellen funktionalen Äquivalent. In der Bilanz der Holz-Bodenplatte stehen material- und prozessbedingten Emissionsbeiträgen von 194,91 kg CO_2e/m^2 eine biogene Kohlenstoffspeicherfähigkeit von –156,37 kg CO_2e/m^2 gegenüber. Unabhängig von der bilanziell berücksichtigten Kohlenstoffspeicherung liegen auch die material- und prozessbedingten Emissionen der Holz-Bodenplatte unter denen des konventionellen Vergleichsaufbaus. Maßgeblich hierfür sind der hohe Anteil biobasierter Schichten, die tragende Holzstruktur sowie der reduzierte Einsatz mineralischer und herstellungsintensiver Baustoffe. Die wesentlichen Emissionsanteile des konventionellen Äquivalents entfallen auf Stahlbeton, Bitumen, EPS, Estrich und PVC-Belag.

Für die im Projekt umgesetzte Bauteillösung wurden transportbedingte Emissionen von 3,18 kg CO_2e/m^2 bilanziert. Berücksichtigt wurden die wesentlichen Primärmaterialien Zellulosedämmung und Brettschichtholz. Die Zellulosedämmung verursacht bei einer Transportdistanz von 1.017 km transportbedingte Emissionen von 2,26 kg CO_2e/m^2 und weist damit den größten Transportemissionsanteil innerhalb der Bodenplatte auf. Bezogen auf die lange Lieferdistanz und den hohen volumenbezogenen Mengenanteil im Bauteil bleibt dieser Wert jedoch moderat, was auf die geringe Rohdichte der Zellulosedämmung zurückzuführen ist. Für das Brettschichtholz wurden

0,92 kg CO_2e/m^2 bei einer bilanzierten Transportdistanz von 312 km ausgewiesen. Der Wert basiert auf der projektbezogenen Lieferstruktur, bei der zwei Drittel der Balken aus 76 km und ein Drittel aus 378 km Entfernung bezogen wurden. Trotz der höheren Rohdichte des Brettschichtholzes bleibt der transportbedingte Beitrag durch den gezielten Einsatz als Tragstruktur vergleichsweise gering.

In der Zirkularitätsbewertung erreicht die Bodenplatte 69,2 von 100 Punkten und liegt damit deutlich über dem konventionellen funktionalen Äquivalent mit 18,5 Punkten. Insbesondere die werkstoffliche Trennbarkeit der naturbasierten Schichten, die Demontagefähigkeit des Massivholzes und das Wiederverwendungspotenzial der Holzbauteile sind für die positive Bilanzierung relevant. Begrenzend wirken die zementgebundene Bauplatte und Dämmstoffe mit eingeschränkter hochwertiger Wiederverwendbarkeit.

Demonstrator und bauliche Umsetzung

Für die Bodenplatte wurde keine eigenständige prototypische Erprobung im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass wesentliche konstruktive Prinzipien der Bodenplatte auf bereits etablierten Methoden des modernen Holzbaus und der Vorfertigung aufbauen. Zur konstruktiven Dokumentation und Vermittlung des ausgeführten konstruktiven Aufbaus wurde ein Demonstrator im Maßstab 1:1 angefertigt. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich daher auf Ausführungsplanung, serielle Vorfertigung, Montage und Fügung mit den angrenzenden Bauteilen. Gleichzeitig wurden wesentliche Schichten des Fußbodenaufbaus im Rahmen der Entwicklung und Erprobung der Holz-Lehm-Hybriddecke als Demonstratoren aufgebaut, untersucht und konstruktiv optimiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die Ausführungsplanung der Bodenplatte ein.

Die Bodenplattenelemente wurden im Holzvorfertigungswerk von B&O Bau in Frankfurt (Oder) seriell hergestellt. Die werkseitige Fertigung erforderte eine präzise Anpassung an die Geometrie des Grundstücks, die Auflagerpunkte der Re-Use-Fundamente sowie die Anschlussdetails der angrenzenden Bauteile. Die Einbindung in den urbanen Bestand führte zu erhöhtem planerischem und aufmaßtechnischem Aufwand, da die Elemente an die vorhandenen Gebäudefluchten, die Bestandswände und die projektspezifische Gründungsstruktur angepasst werden mussten.

Auf der Baustelle wurde die Bodenplatte früh im Rohbau montiert und bildete die konstruktive Ausgangsebene für die nachfolgenden Bauteile. Die Montage erfolgte mittels Krans; dabei waren vor allem die Positionierung, der Höhenausgleich und die Anschlusslogik maßgeblich für den weiteren Bauablauf. für den weiteren Bauablauf.

Die Bodenplatte fungierte im Bauprozess als Schnittstelle zwischen Re-Use-Fundamentierung, aufgehenden Holz- und Lehmbauteilen sowie dem späteren Innenausbau. Ihre erfolgreiche Umsetzung war von zentraler Bedeutung für die Integrationsfähigkeit der entwickelten Gesamtbauweise und erforderte eine besonders genaue Koordination von Vorfertigung, Transport, Einheben, Ausrichten und Anschlussausbildung.

Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologisch zeigt die Holz-Bodenplatte, wie eine Holzkonstruktion

im erdnahen Bereich durch die konstruktive Trennung vom Erdreich, kontrollierte Unterlüftung und dauerhafte Zugänglichkeit sicher ausgeführt werden kann. Die serielle Vorfertigung und der lösbar aufgebaute, überwiegend biobasierte Schichtenaufbau schaffen zugleich Voraussetzungen für eine präzise Montage, spätere Wartung sowie die Trennung und Wiederverwendung wesentlicher Bauteilschichten.

Regulatorisch konnte die Bodenplatte innerhalb der geltenden landesbaurechtlichen Vorgaben und der anerkannten Regeln der Technik ausgeführt werden. Für die realisierte Konstruktion waren keine besonderen bauordnungsrechtlichen Abweichungen, Zustimmungen im Einzelfall oder zusätzlichen projektspezifischen Nachweise erforderlich.

Ökonomisch ist die Bodenplatte vor allem im Zusammenhang mit serieller Vorfertigung, Aufmaßgenauigkeit und Anschlusskoordination zu betrachten. Durch die vorhandenen Vorfertigungsstrukturen der B&O Bau konnten standardisierte Fertigungsprozesse genutzt und typische Mehrkosten einer erstmaligen Sonderanfertigung begrenzt werden. Zusätzliche Aufwände entstanden vor allem durch die Einpassung der vorgefertigten Elemente in die Bestandsgeometrie und die Re-Use-Gründung sowie durch die Koordination der konstruktiven Schnittstellen. Eine unmittelbare Kostenvergleichbarkeit mit konventionellen Bodenplatten ist nur eingeschränkt möglich, da die Umsetzung im Rahmen eines Forschungs- und Demonstrationsvorhabens und als Bestandteil einer neuartigen Gesamtbauweise erfolgte.

3.1.3 Tragendes Lehmsteinmauerwerk

Bauteilentwurf und Entwicklung

Die tragende Innenwand wurde als lastabtragendes Mauerwerk konzipiert und mit unstabilisierten Lehmsteinen ausgeführt. Der Bauteilentwurf ersetzt das konventionelle funktionale Äquivalent aus verputztem Kalksandsteinmauerwerk durch ein monolithisches Mauerwerk aus Lehmsteinen und Lehmmauermörtel. In der ausgeführten Variante wurde die Wand als 365 mm starkes Sichtmauerwerk aus 2DF- und 3DF-Lehmsteinen in einem eigens entwickelten Verband hergestellt.

Ausgangspunkt der Entwicklung war ein konventionell vor Ort gemauertes Lehmsteinmauerwerk. Im Projektverlauf wurde das Konzept auf Anregung des Industrieverbands Lehmbaustoffe um die Vorfertigung von Mauerwerkselementen erweitert, mit dem Ziel, das tragende Lehmsteinmauerwerk in eine industrialisierte Ausführung zu überführen. Hierfür wurde die Zusammenarbeit mit der August Lücking GmbH aufgebaut, um die Ergebnisse des projektinternen Prototypings in ein ausführbares Bauteilsystem zu übertragen.

Der weiterentwickelte Bauteilentwurf integrierte vorgefertigte Wandfragmente, die auf der Baustelle zu einem durchgehenden tragenden Mauerwerk gefügt wurden. Damit wurden Mauerwerksverband, Elementierung, Fugenbild, Maßhaltigkeit und Anschlussausbildung zu zentralen Entwurfsparametern. Die Wand musste zugleich ihre tragende Funktion erfüllen, eine durchgängige Sichtoberfläche ausbilden und mit den angrenzenden Holz- und Deckenelementen anschlussfähig sein. Die Vorfertigung verband damit die materialspezifischen Eigenschaften des Lehmsteinmauerwerks mit den Anforderungen industrieller Fertigungs-, Transport- und Montageprozesse.

Die Ausführung als Sichtmauerwerk diente der unmittelbaren Erfahrbarkeit des Materials, seiner konstruktiven Logik sowie seiner baukulturellen und gestalterischen Qualitäten. Daraus ergaben sich zugleich erhöhte Anforderungen an Verband, Fugenbild, Elementierung, Anschlussdetails und Maßhaltigkeit. Der entwickelte Mauerwerksverband wurde daher sowohl unter konstruktiven als auch unter gestalterischen Gesichtspunkten ausgearbeitet.

Ökologische Bewertung

Die vergleichende Lebenszyklusanalyse bilanziert für die tragende Innenwand ein GWP-total von 37,40 kg CO_2e/m^2, während das konventionelle funktionale Äquivalent aus Kalksandsteinmauerwerk bei 82,36 kg CO_2e/m^2 liegt. Damit reduziert die Lehmsteinwand die berechneten Treibhausgasemissionen um rund 55 %. Diese Reduktion ist vor allem auf den geringeren Energiebedarf der Herstellung zurückzuführen. Bei konventionellen Mauerwerkselementen tragen insbesondere Brennprozesse oder die Herstellung mineralischer Bindemittel wesentlich zu den Emissionen bei. Ungebrannte Lehmsteine kommen ohne diese Prozessschritte aus und lassen sich daher mit deutlich geringerem Primärenergieeinsatz herstellen.

Die transportbedingten Emissionen des Lehmsteinmauerwerks betragen 23,70 kg CO_2e/m^2 bei einer Transportdistanz von 449 km. Innerhalb der betrachteten Bauteile weist die tragende Innenwand damit den höchsten transportbezogenen Beitrag pro Quadratmeter Bauteil auf, der aus der hohen Materialmasse, der monolithischen Anwendung und der projektspezifischen Lieferdistanz resultiert. Die Ergebnisse verdeutlichen hier bereits, dass bei massiven Naturbaustoffen die Regionalität der Rohstoffgewinnung und der Weiterverarbeitung einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtumweltwirkung haben kann.

In der Zirkularitätsbewertung erreicht die tragende Innenwand 62,5 von 100 Punkten und liegt damit deutlich über dem konventionellen funktionalen Äquivalent, welches mit 14,4 Punkten berechnet wurde. Besonders hoch bewertet werden die werkstoffliche Trennbarkeit und das Wiederverwendungspotenzial, denn unstabilisierte, ungebrannte Lehmbaustoffe bilden ein sortenreines mineralisches System, das rückgebaut und ohne Qualitätsverlust in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Auch die Demontagefähigkeit wird positiv bewertet, da das Mauerwerk mit einfachem Werkzeug abgetragen werden kann. Innerhalb der angewendeten Bewertungssystematik wirkt sich die Einstufung der Materialherkunft von Lehm als nicht erneuerbarer Primärrohstoff limitierend aus, da die Materialherkunft folglich mit 0 Punkten bewertet wird. Diese Einordnung bildet die geologische Realität jedoch nur unzureichend ab, denn Lehm ist regional in großen Mengen verfügbar und seine Gewinnung verursacht im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen eine nur geringe ökologische Belastung.

Als weiterführende Optimierungsvariante wurde eine Reduktion der Wandstärke von 365 auf 240 mm angestrebt. Die visionäre Bauteilvariante basiert auf 2DF-Lehmsteinen mit erhöhter Steindruckfestigkeit und einem Lehmmauermörtel mit höherer Haftscherfestigkeit. Der verringerte Wandquerschnitt reduziert den Materialeinsatz bei gleichbleibender tragender Funktion und bildet damit einen wesentlichen Ansatz zur weiteren Verbesserung der Materialeffizienz. Ergänzend wurde die Herkunft des eingesetzten

Lehms als ökologisches Optimierungsfeld identifiziert. Die Nutzung geeigneter, lokal anfallender Baustellenaushübe als Sekundärrohstoff könnte den Bedarf an primären Rohstoffen sowie die transportbedingten Emissionen der massiven Lehmkonstruktion weiter reduzieren. Die Umsetzung der optimierten Variante setzte Materialkennwerte, statische Nachweise, qualitätsgesicherte Rohstoff- und Herstellungsprozesse sowie eine baupraktische Absicherung voraus, die innerhalb des Projektzeitraums noch nicht vollständig erarbeitet werden konnten.

Prototyping und bauliche Umsetzung

Das tragende Lehmsteinmauerwerk wurde anhand von drei Prototypen im Maßstab 1:1 schrittweise entwickelt. Im Mittelpunkt standen zunächst die gestalterische Ausbildung des Sichtmauerwerks und die materialgerechte Entwicklung eines eigenen Mauerwerksverbands. Untersucht wurden die räumliche Wirkung der Sichtoberfläche sowie die Ausbildung des Fugenbildes hinsichtlich Fugenbreiten und Fugenrücksprüngen.

Im ersten Prototyp wurden die Lehmsteine um etwa 40 Grad gedreht angeordnet, sodass sie lagenweise um rund 5 cm aus der Wandfläche hervortraten. Diese stark reliefierte Ausbildung erwies sich als ungeeignet, da die exponierten Steinkanten bereits am Prototyp teilweise absplitterten. Im zweiten Prototyp wurden die Längssteine um etwa 2 cm aus der Wandfläche gedreht. Die daraus entstehenden ungleichmäßigen Fugen ließen das Mauerwerk jedoch unpräzise erscheinen. Im dritten Prototyp wurden die Kopfsteine geradlinig um etwa 1 cm vorgezogen. Diese Variante wurde nach Abstimmung in der Forschungsgemeinschaft dem ausgeführten Verband zugrunde gelegt.

Im Zuge der weiteren Bauteilentwicklung wurde der Verband auf vorgefertigte Wandfragmente übertragen. Untersucht wurden die Elementierung, die Ausbildung der offen verzahnten Stoßbereiche sowie das Zusammenführen und nachträgliche Vermauern der Segmente auf der Baustelle. Daraus wurden die erforderlichen Abstände und Toleranzen im Bereich der Elementstöße abgeleitet. Entscheidend war, dass das Mauerwerk nach dem Vermauern der Stöße als zusammenhängende Konstruktion und durchgängige Sichtoberfläche ausgebildet werden konnte.

Für die bauliche Umsetzung wurden die Wandfragmente im Werk vorgefertigt, zur Baustelle transportiert, eingehoben und ausgerichtet. Anschließend wurden die offen verzahnten Stöße vor Ort ausgemauert und kraftschlüssig verbunden. Die Ausführung erforderte eine genaue Abstimmung von Elementabmessungen, Mauerwerksverband, Stoßgeometrie und Montagetoleranzen sowie die Koordination mit Bodenplatte, Geschossdecken und angrenzenden Holzbauteilen.

Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologisch liegt das Ergebnis der tragenden Innenwand in der Überführung eines massiven Lehmsteinmauerwerks in eine vorgefertigte und elementierte Bauteillösung. Das Mauerwerk verbindet die materialspezifischen Eigenschaften des Lehms mit Anforderungen an Tragfähigkeit, Maßhaltigkeit, Transport, Montage und sichtbare Oberflächenqualität. Die wesentliche Entwicklungsleistung bestand dabei in der Kombination von tragendem Lehmsteinmauerwerk mit industriellen Fertigungs- und Monta-

geprozessen, ohne die materialtypischen Eigenschaften und die Gestaltqualität des sichtbaren Mauerwerks zu verlieren.

Ökonomisch ist die tragende Innenwand nur eingeschränkt mit konventionellen Mauerwerkskonstruktionen vergleichbar. Die im Projekt realisierte Lösung kombiniert mehrere Merkmale, die über eine übliche Wandkonstruktion hinausgehen: tragendes Lehmsteinmauerwerk, sichtbare Oberflächenqualität, einen eigens entwickelten Mauerwerksverband sowie die Vorfertigung großformatiger Wandfragmente. Ein unmittelbarer Vergleich mit einem verputzten oder gespachtelten Kalksandsteinmauerwerk würde daher unterschiedliche funktionale und gestalterische Anforderungen gegenüberstellen und wäre nur begrenzt aussagekräftig.

Die erhöhten Kosten der ausgeführten Variante resultieren nicht allein aus dem Baustoff Lehm, sondern insbesondere aus der Kombination von Sichtmauerwerksqualität, eigens entwickeltem Verband und Vorfertigung großformatiger Wandfragmente. Wirtschaftliche Potenziale liegen daher vor allem in vereinfachten Verbandssystemen, weniger anspruchsvollen Oberflächen sowie der Standardisierung von Bauteilen und Fertigungsabläufen.

Regulatorisch konnte die tragende Innenwand innerhalb der geltenden normativen und bauordnungsrechtlichen Anforderungen sowie auf Grundlage der erforderlichen bautechnischen Nachweise umgesetzt werden. Für die realisierte Ausführung waren weder besondere Abweichungen noch Zustimmungen im Einzelfall oder zusätzliche projektspezifische bauordnungsrechtliche Verfahren erforderlich. Die Umsetzung zeigt damit, dass die bestehenden normativen Grundlagen für die im Projekt realisierte Anwendung des tragenden Lehmsteinmauerwerks ausreichten.

3.1.4 Holz-Gebäudeabschlusswand

Bauteilentwurf und Entwicklung

Die Gebäudeabschlusswand wurde als tragende, seriell vorgefertigte Holzkonstruktion mit erhöhten brandschutztechnischen Anforderungen entwickelt und im Bauvorhaben umgesetzt. Das Bauteil adressiert eine zentrale Herausforderung des mehrgeschossigen Holzbaus: die Verbindung eines hohen Vorfertigungsgrades mit den Anforderungen an Gebäudeabschluss- und Brandwände in verdichteten städtischen Kontexten. Der Bauteilentwurf überführt das üblicherweise mineralisch ausgeführte Bauteil in einen mehrschichtigen Holzaufbau, der Tragfähigkeit, Brandschutz, Wärmeschutz, Luftdichtheit und raumseitige Sichtqualität in einem System zusammenführt. Als konventionelles funktionales Äquivalent dient eine Konstruktion aus verputztem Kalksandsteinmauerwerk und Mineralwolldämmung.

Grundlage bildete das serielle Wandsystem von B&O Bau, das für die projektspezifischen Anforderungen des HLCB weiterentwickelt wurde. Anpassungen umfassten insbesondere die Geschosshöhen, die brandschutztechnische Ausbildung sowie die Anschlüsse an Bodenplatte und Geschossdecken. Schwellen, Stützen und Rähme wurden dabei als integrale Bestandteile der Trag-, Element- und Fügungslogik ausgebildet und bereits im Entwurf auf Vorfertigung, Transport und kranbasierte Montage abgestimmt.

Die Gebäudeabschlusswand gliedert sich in eine raumseitig sichtbare Tragstruktur aus unmittelbar aneinandergereihten Kiefernstielen und eine daran anschließende gedämmte Holzrahmenkonstruktion. Eine aussteifende Holzwerkstoffplatte verbindet die Kiefernstiele zu einer tragenden Scheibe.

Darauf folgen eine Dampfbremse sowie eine Holzrahmenebene aus Kiefer-Konstruktionsvollholz mit Zellulose-Einblasdämmung und beidseitiger Beplankung aus Gipsfaserplatten, zur Nachbarbebauung schließt eine Luftschicht den Wandaufbau ab.

Die raumseitig sichtbaren Kiefernstiele wurden mit einem für den Brandfall bemessenen Abbrandquerschnitt dimensioniert und können daher unverkleidet bleiben. Der erforderliche Feuerwiderstand wird durch das Zusammenwirken der massiven Holzquerschnitte mit der beplankten und gedämmten Holzrahmenebene erreicht und über die nachgewiesene Systemlösung belegt.

Ökologische Bewertung

Die vergleichende Lebenszyklusanalyse bilanziert für die Holz-Gebäudeabschlusswand ein GWP-total von 32,05 kg CO_2e/m^2, gegenüber 117,79 kg CO_2e/m^2 für das konventionelle funktionale Äquivalent. Dies entspricht einer Reduktion von rund 73 %. In der Bilanz der im Projekt umgesetzten Bauteillösung stehen material- und prozessbedingten Emissionsbeiträgen von 202,94 kg CO_2e/m^2 eine biogene Kohlenstoffspeicherfähigkeit von −170,89 kg CO_2e/m^2 gegenüber. Maßgeblich für die Reduktion sind der hohe Anteil an Massivholz und Zellulosedämmung sowie der geringere Einsatz emissionsintensiver mineralischer Baustoffe gegenüber dem konventionellen Vergleichsaufbau aus Gipsputz, Kalksandsteinmauerwerk und Mineralwolldämmung.

Für die Gebäudeabschlusswand wurden transportbedingte Emissionen von insgesamt 3,21 kg CO_2e/m^2 bilanziert. Die Zellulosedämmung verursacht bei einer Transportdistanz von 1.017 km einen Beitrag von 1,66 kg CO_2e/m^2, während auf das Konstruktionsvollholz bei einer Transportdistanz von 275 km 1,55 kg CO_2e/m^2 entfallen. Ähnlich wie bei der Holz-Bodenplatte liegt der Transportemissionsanteil der Zellulosedämmung trotz der fast vierfachen Lieferdistanz aufgrund ihrer geringen Rohdichte nur geringfügig über dem des Konstruktionsvollholzes. Das Holz weist aufgrund seiner höheren Materialmasse bereits bei einer deutlich kürzeren Lieferstrecke einen nahezu gleich hohen Bilanzwert auf.

In der Zirkularitätsbewertung erreicht die Gebäudeabschlusswand 66,2 von 100 Punkten, wobei das konventionelle funktionale Äquivalent bei 25,2 Punkten liegt. Die höchste Teilbewertung entfällt mit 85,2 Punkten auf die werkstoffliche Trennbarkeit. Positiv wirken sich außerdem der hohe Anteil erneuerbarer Primärrohstoffe, die überwiegend lösbare Fügung der Massivholzelemente sowie die weitgehend sortenreine Trennbarkeit der naturbasierten Materialien aus. Begrenzend wirken die geklebte Dampfbremse, die Gipsfaser- und Holzwerkstoffplatten sowie das eingeschränkte Wiederverwendungspotenzial der rezyklierten Zellulosedämmung.

Als weiterführende Optimierungsvariante wurde ein Wandaufbau mit einem höheren Anteil wiederverwendeter und naturbasierter Materialien entwickelt. Die visionäre Gebäudeabschlusswand sieht schwere Lehmbauplatten mit einer Feuerwiderstandsfähigkeit von 90 Minuten anstelle der Gipsfaserplatten, eine ökologische Dampfbremse, eine Dämmebene aus Schilfrohr aus regionaler Paludikultur, wiederverwendetes Konstruktionsvollholz und eine äußere Bekleidung aus karbonisiertem Massivholz vor. Damit ließen sich insbesondere gipsgebundene Plattenwerkstoffe ersetzen und zusätzliche Potenziale für nachwachsende und wiederverwendete

Rohstoffe erschließen. Im Projektzeitraum war die Umsetzung jedoch aufgrund fehlender normkonformer Lehmbauplatten, begrenzter Produktverfügbarkeit und noch nicht etablierter Lieferstrukturen für die vorgesehenen Materialien nicht möglich. Die Variante dokumentiert daher einen weiterführenden Entwicklungspfad, dessen Umsetzung derzeit vor allem durch Produktverfügbarkeit, Normung, Zulassung und industrielle Lieferketten begrenzt wird.

Demonstrator und bauliche Umsetzung

Wie bei der Holz-Bodenplatte wurde auch für die Holz-Gebäudeabschlusswand im Rahmen des Forschungsprojekts keine eigenständige bauteilbezogene Erprobung durchgeführt. Wesentliche konstruktive Prinzipien basieren auf langjährig etablierten Systemen des seriellen Holzbaus. Zur konstruktiven Dokumentation und anschaulichen Vermittlung der entwickelten Lösung wurde stattdessen ein 1,50 × 1,00 m großes Wandfragment im Maßstab 1:1 angefertigt.

Im Kontext des Bauprojekts wurden die Wandelemente im Holzvorfertigungswerk von B&O Bau in Frankfurt (Oder) seriell hergestellt. Dort wurden die Kiefernstiele unmittelbar aneinandergereiht und verklammert sowie mit der aussteifenden Holzwerkstoffplatte und der gedämmten Holzrahmenebene zu vollständigen Wandelementen verbunden. Dabei wurden robotergestützte Fertigungsschritte des Holzrahmenbaus mit der Herstellung der massiven Holzstielebene kombiniert.

Aufgrund der werkseitigen und transportbedingten Höhenbeschränkungen konnte das standardisierte Wandsystem nicht unmittelbar auf die Geschosshöhen des Bauvorhabens übertragen werden. Die Gebäudeabschlusswand wurde daher als Sondertyp ausgeführt, bei dem die Wandelemente über zusätzliche Stützen und Rähme in die Gebäudestruktur eingebunden sind. So konnten die Elemente unter den bestehenden Produktions- und Transportbedingungen gefertigt und zugleich die erforderlichen Geschosshöhen im Bauwerk erreicht werden.

Die Montage der vorgefertigten Wandelemente erfolgte kranbasiert und in enger Abstimmung mit der bereits ausgeführten Bodenplatte und den anschließend montierten Geschossdecken. Maßgeblich für die Ausführungsqualität waren die genaue Positionierung von Schwellen, Stützen und Rähmen, die Passgenauigkeit der Querschub- und Metallsteckverbinder, die Ausbildung der Elementfugen sowie die durchgängige Fortführung der luftdichten Ebene. Nach der Montage wurden die Fugen zwischen den Wandelementen mit Mineralwolle ausgefüllt. Die Gebäudeabschlusswand bildet damit eine zentrale konstruktive Schnittstelle zwischen Bodenplatte, Geschossdecken und Nachbarbebauung.

Für die sichtbare Tragstruktur wurde ausschließlich Konstruktionsvollholz aus Kiefer ohne Fase eingesetzt. Diese Ausführung führte punktuell zu geringfügiger Splintbildung, erzeugte insgesamt jedoch ein homogenes Erscheinungsbild der Wandoberfläche. Die Kiefernstiele erhielten lediglich eine schwach weiß pigmentierte Lasur. Materialmerkmale und herstellungsbedingte Spuren, darunter die sichtbaren Verklammerungen der Wandelemente, bleiben als Bestandteile der Konstruktion ablesbar.

Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologisch wurde ein bestehendes serielles Holzbausystem zu einem projektspezifischen Sondertyp mit sichtbarer tragender Holzstruktur und nachgewiesener Brandwandfunktion weiterentwickelt. Entscheidend war die integrale Abstimmung von Tragwerk, Wandaufbau, Bekleidung, Vorfertigung und brandschutztechnischer Nachweisführung.

Ökonomisch konnte auf bestehende industrielle Fertigungsstrukturen und etablierte Produktionsprozesse zurückgegriffen werden. Zusätzlicher planerischer und fertigungstechnischer Aufwand entstand vor allem durch die Entwicklung des Sondertyps, die Anpassung an die werkseitigen und transportbedingten Höhenbeschränkungen, die brandschutztechnische Detailausbildung sowie die Koordination der Anschlüsse an Bodenplatte und Geschossdecken. Eine eigenständige quantitative Kostenbewertung wurde im Rahmen der Bauteilauswertung nicht vorgenommen.

Regulatorisch zählt die Gebäudeabschlusswand zu den Bauteilen mit projektspezifischem Abstimmungsbedarf. Der Neubau ist trotz seiner zweigeschossigen Ausführung der Gebäudeklasse 5 zugeordnet. Die Gebäudeabschlusswand wurde im Brandschutzkonzept als „brennbare Wand in Form einer Brandwand“ ausgewiesen. Die Ausführung mit raumseitig sichtbaren Kiefernstielen erforderte eine projektspezifische Abweichung, die beantragt und behördlich genehmigt wurde. Die brandschutztechnische Bewertung erfolgte auf Grundlage des vollständigen Wandaufbaus einschließlich der äußeren Bekleidung und des zugehörigen System- beziehungsweise Verwendbarkeitsnachweises.

3.1.5 Holz-Lehm-Hybriddecke

Bauteilentwurf und Entwicklung

Die Holz-Lehm-Hybriddecke wurde als mehrschichtiges Deckensystem entwickelt und verbindet ein weitspannendes Primärtragwerk aus Kiefer-Brettschichtholz mit eingehängten, nicht tragenden Lehmeinhangsteinen. Diese bringen raumklimatisch und akustisch wirksame Masse in die leichte Holzkonstruktion ein. Das konventionelle funktionale Äquivalent einer Stahlbetondecke wird damit durch eine Konstruktion aus weitgehend naturbasierten und trennbar gefügten Materialien ersetzt. Ziel der Entwicklung war es, die Vorteile leichter Holztragwerke mit den bauphysikalischen Eigenschaften massiver mineralischer Baustoffe zu verbinden. Sowohl der konstruktive Aufbau als auch die Geometrie des Lehmeinhangsteins wurden im Projektverlauf schrittweise entwickelt und aufeinander abgestimmt.

Das konstruktive Prinzip orientiert sich an Hourdis-Systemen, bei denen einzelne Formsteine zwischen linearen Tragelementen angeordnet werden. Die Lehmeinhangsteine lagern seitlich auf jeweils 25 mm tiefen Auflagern der Holzbalken und überspannen den verbleibenden Zwischenraum. Eine oberhalb der Balken angeordnete Holzwerkstoffplatte übernimmt die aussteifende und lastverteilende Funktion und leitet die Lasten des Fußbodenaufbaus und der Nutzung unmittelbar in die Brettschichtholzbalken ein. Die Lehmeinhangsteine tragen ausschließlich ihr Eigengewicht und bleiben von den darüberliegenden Lasten konstruktiv entkoppelt.

Die Abmessungen und die Position der Lehmeinhangsteine innerhalb des Balkenquerschnitts wurden aus den Anforderungen an Auflagerung, Handhabbarkeit, Brandschutz und industrielle Herstellbarkeit abgeleitet. Die

seitliche Auflagerung ermöglicht eine trockene und lösbare Verbindung von Holz und Lehm. Gleichzeitig wurde die Lage der Steine so festgelegt, dass zwischen ihrer Unterseite und der Unterkante der Balken keine tiefen, voneinander getrennten Rauchreservoirs entstehen können.

Der ausgeführte Aufbau besteht aus Brettschichtholzbalken im Achsabstand von 700 mm und dazwischen eingehängten Lehmeinhangsteinen mit Abmessungen von etwa 500 × 200 × 140 mm. Oberhalb der Steine wird der Zwischenraum mit Schafwolldämmung ausgefüllt. Den oberen Abschluss der Tragkonstruktion bildet eine Holzwerkstoffplatte, die die Lasten verteilt und die Balken zu einer aussteifenden Deckenscheibe verbindet. Der weitere Fußbodenaufbau entspricht in seinen wesentlichen Schichten dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Aufbau der Holz-Bodenplatte. Die weitgehend trockene Fügung ermöglicht einen schichtweisen Rückbau und die getrennte Weiterverwendung der wesentlichen Materialien.

Für technische Installationen wurden innerhalb der Lehmsteinebene gezielt Felder ausgespart und durch Einlegebretter geschlossen. Die dadurch entstehenden Hohlräume nehmen Komponenten der Beleuchtungstechnik auf und bleiben über den Deckenaufbau zugänglich. Die Integration der technischen Gebäudeausrüstung wurde damit bereits im Bauteilentwurf auf die konstruktive Ordnung und den sichtbaren Rhythmus der Deckenuntersicht abgestimmt.

Ökologische Bewertung

Die vergleichende Lebenszyklusanalyse ergibt für die Holz-Lehm-Hybriddecke ein GWP-total von 39,80 kg CO_2e/m^2 gegenüber 169,50 kg CO_2e/m^2 für das konventionelle funktionale Äquivalent. Dies entspricht einer Reduktion der bilanzierten Treibhausgasemissionen um rund 77 %. In der Bilanz der Hybriddecke stehen material- und prozessbedingten Emissionsbeiträgen von 179,22 kg CO_2e/m^2 eine biogene Kohlenstoffspeicherfähigkeit von -139,43 kg CO_2e/m^2 gegenüber. Maßgeblich für das Ergebnis sind die tragende Holzstruktur, die ungebrannten Lehmeinhangsteine und der hohe Anteil biobasierter Materialien im Fußbodenaufbau.

Für das im Projekt umgesetzte Bauteil wurden transportbedingte Emissionen von insgesamt 7,91 kg CO_2e/m^2 bilanziert. Den größten Beitrag verursachen die Lehmeinhangsteine mit 5,37 kg CO_2e/m^2 bei einer Transportdistanz von 449 km. Auf das Brettschichtholz entfallen 2,54 kg CO_2e/m^2 bei einer Distanz von 312 km. Ähnlich wie bei der Holz-Bodenplatte wurde für die Berechnung der Transportemissionen das gewichtete Mittel aus zwei unterschiedlichen Lieferstrukturen angenommen. Die Ergebnisse zeigen insbesondere bei den massiven Lehmeinhangsteinen ein relevantes Optimierungspotenzial durch regionale Rohstoffgewinnung und standortnahe Produktion.

In der Zirkularitätsbewertung erreicht die Holz-Lehm-Hybriddecke 71,5 von 100 Punkten und damit den höchsten Wert der untersuchten HLH-Bauteile. Das konventionelle funktionale Äquivalent erreicht 20,5 Punkte. Die werkstoffliche Trennbarkeit wurde mit 84,5 Punkten besonders hoch bewertet. Die Materialherkunft erreicht dagegen 44,0 Punkte, da Lehm innerhalb der angewendeten Bewertungsmethodik als nicht erneuerbarer Primärrohstoff eingestuft wird und die ausgeführte Konstruktion keine wiederverwendeten Bauteile enthält. Weitere Einschränkungen ergeben sich aus der

Holzwerkstoffplatte und einzelnen Verbundprodukten des Fußbodenaufbaus.

Als weiterführende Optimierungsvariante wurde eine Holz-Lehm-Kappendecke mit größeren Balkenabständen und tragend wirksamen Lehmsteinen untersucht. Die visionäre Konstruktion sieht außerdem wiederverwendete Holzdielen und Brettschichtholzbalken aus Gebrauchtholz vor. Durch die tragende Aktivierung der Lehmeinhangsteine könnten größere Spannweiten zwischen den Balken erzielt und der Holzanteil der Deckenkonstruktion reduziert werden. Die Umsetzung setzt eine Weiterentwicklung der Steingeometrie, belastbare Tragfähigkeitsnachweise und eine bauaufsichtlich abgesicherte Anwendung tragender Lehmeinhangsteine in horizontalen Bauteilen voraus. Entsprechende Zulassungen und geeignete wiederverwendbare Holzquerschnitte standen im Projektzeitraum nicht zur Verfügung. Die Variante verdeutlicht damit ein relevantes Entwicklungspotenzial zukünftiger Holz-Lehm-Hybridkonstruktionen, dessen Umsetzung derzeit vor allem durch fehlende normative und produktspezifische Grundlagen begrenzt ist.

Prototyping und bauliche Umsetzung

Die Entwicklung der Holz-Lehm-Hybriddecke wurde durch eine mehrstufige Erprobungs- und Validierungsphase begleitet. Zunächst wurden massive Lehmdeckensteine in der Bauhaus Erde Forschungswerkstatt formgepresst und hinsichtlich Maßhaltigkeit, Schwindverhalten, Kantenfestigkeit und Handhabbarkeit untersucht. Die getrockneten Versuchskörper wiesen keine sichtbaren Risse und nur geringe Maßabweichungen auf. Bei einem Trockengewicht von 27,75 kg pro Einhangstein wurde eine Rohdichte von 2002 kg/m³ erreicht. Die Steine ließen sich mit geringem seitlichem Abrieb zwischen die Balken einlegen.

Anschließend wurde ein begehbarer DeckenPrototyp im Maßstab 1:1 mit insgesamt drei Deckenfeldern hergestellt. Der Prototyp bildete die tragende Balkenlage, die eingehängten Lehmsteine und den vollständigen Fußbodenaufbau ab. Die schichtweise zurückspringende Ausbildung des Bodenaufbaus ermöglichte die Begutachtung der einzelnen Materialien und ihrer Fügung. Untersucht wurden insbesondere die Lagerung der Steine auf den Holzbalken, der Einsatz eines Filzstreifens, eine mögliche Verbindung durch Lehmmörtel sowie die Zugänglichkeit und Rückbaubarkeit der Fußbodenschichten. Darüber hinaus wurden am Demonstrator wesentliche Bestandteile des späteren Fußbodenaufbaus untersucht und konstruktiv weiterentwickelt.

Die Versuche zeigten, dass das Eigengewicht der Lehmsteine für eine stabile Lagerung innerhalb der Balkenkonstruktion ausreicht. Eine zusätzliche Fixierung mit Lehmmörtel brachte keinen konstruktiven Vorteil und wurde aufgrund auftretender Schwindrisse und der eingeschränkten Rückbaubarkeit nicht weiterverfolgt. Auch der Filzstreifen wurde verworfen, da sich beim Einlegen kein relevanter Unterschied zeigte, mögliche akustische Auswirkungen im Prototyping nicht bewertet werden konnten und der Streifen die sichtbare Fuge beeinträchtigte. Die am Deckenprototyp gewonnenen Erkenntnisse flossen zugleich in die Entwicklung des auch bei der Holz-Bodenplatte eingesetzten Fußbodenaufbaus ein.

Für die Überführung in die industrielle Produktion wurde die Steinform an das Strangpressverfahren von August Lücking angepasst. Gemeinsam mit

dem Hersteller wurde hierfür ein neues Mundstück entwickelt und gefertigt. Die erforderliche höhere Materialfeuchte und das daraus resultierende Schwindverhalten machten eine Lochung der Steine erforderlich. Der finale Lehmeinhangstein besitzt 20 kleinere und neun größere Hohlräume mit einem Gesamtlochanteil von rund 18 %. Nach siebentägiger Trocknung unter Nutzung der Abwärme des Ziegelofens und einer anschließenden passiven Trocknungsphase erreichten die industriell gefertigten Steine eine mittlere Rohdichte von 1.673,6 kg/m³. Bei einer mittigen Punktbelastung von 200 kg zeigte keiner der geprüften Steine Anzeichen eines Versagens. Trotz eines Gesamtschwindmaßes von bis zu 3 mm lag die Maßabweichung zwischen den untersuchten Steinen unter 1 mm.

Im industriellen Produktionslauf wurden rund 10.000 Lehmeinhangsteine hergestellt. Das Strangpressverfahren erreichte eine Produktionsgeschwindigkeit von etwa einem Stein in zwei Sekunden beziehungsweise bis zu 30 Steinen pro Minute. Damit konnte die Übertragbarkeit der zuvor prototypisch entwickelten Geometrie auf einen industriellen Fertigungsprozess nachgewiesen werden.

Die Ausführung der Holz-Lehm-Hybriddecken begann im August 2025. Für die Fuge zwischen Holzbalken und Lehmeinhangstein war zunächst eine Toleranz von jeweils 1,5 mm vorgesehen. Beim Einlegen zeigte sich, dass sich die Maßtoleranzen der Holzbauteile und der Lehmsteinproduktion überlagerten und die vorgesehene Gesamtfuge von 3 mm teilweise überschritten. Einzelne Steine konnten dadurch nicht vollständig auf den seitlichen Auflagern positioniert werden.

Da die Serienproduktion zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen war, wurden die betroffenen Lehmeinhangsteine auf der Baustelle mittels Bandsägenschnitt um etwa 5 mm gekürzt. Anschließend konnten die Steine vollständig und ohne weitere Hindernisse in die Deckenfelder eingelegt werden. Die Anpassung war konstruktiv unkritisch, da die Steine keine Lasten des Fußbodenaufbaus oder der Nutzung aufnehmen. Auf Grundlage dieser Erfahrung wurde die seitliche Toleranz im aktualisierten Regeldetail von 1,5 auf 5 mm je Seite erhöht. Damit wurden die kumulierten Maßabweichungen der Holz- und Lehmsteinproduktion in die weitere Systemplanung überführt. Zugleich zeigte die Nachbearbeitung, dass sich die Lehmeinhangsteine mit üblichen Baustellenwerkzeugen an abweichende Balkenabstände anpassen lassen.

Die Balken der Geschossdecke wurden über Metallsteckverbinder an die Rähme der Gebäudeabschlusswände, den Mittelunterzug und die Außenwände angeschlossen. Im Bereich der Lehmwände wurden die Holzbalken über einbetonierte Stahllaschen an den Ringanker angebunden. Nach der Montage der Balkenlage und dem Einlegen der Lehmeinhangsteine wurden die Holzwerkstoffplatten sowie die weiteren Schichten des Fußbodenaufbaus aufgebracht. Die bauliche Umsetzung erforderte insbesondere eine präzise Abstimmung der Maßtoleranzen, Montagefolgen und Anschlüsse zwischen Holzbau, Lehmsteinproduktion und den aufgehenden Bauteilen.

Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologisch liegt das zentrale Ergebnis in der Entwicklung eines serienfähig herstellbaren Lehmeinhangsteins für Holzgeschossdecken und weitere Deckensysteme mit stabförmigem Primärtragwerk. Die Übertragung

von der formgepressten Kleinserie in ein industrielles Strangpressverfahren gelang durch die Anpassung der Steingeometrie und die Entwicklung eines projektspezifischen Mundstücks. Damit konnte eine bestehende Produktionsanlage der Ziegelindustrie für die Herstellung ungebrannter Lehmbauteile genutzt werden. Die Baugruppe aus Lehmeinhangstein und tragender Holzkonstruktion wurde im Projektverlauf zum Patent angemeldet und unter dem Aktenzeichen BOB101 „Lehmeinhangstein, Herstellungsverfahren und Baugruppe“ veröffentlicht. Seit Ende 2025 werden die Lehmeinhangsteine auch für weitere Bauvorhaben vertrieben.

Regulatorisch erleichtert die Ausbildung der Lehmeinhangsteine als nicht tragende Füllelemente ihre Integration in bestehende Planungs- und Nachweisstrukturen. Die Lasten werden vollständig über die Brettschichtholzbalken und die aussteifende Holzwerkstoffplatte abgetragen; die Lehmeinhangsteine tragen ausschließlich ihr Eigengewicht. Die brandschutztechnische Bewertung berücksichtigt die bemessenen Holzquerschnitte und die konstruktive Anordnung der Steine. Durch die Reduktion der ursprünglich höher angesetzten Schüttlasten konnten zugleich die Anforderungen an das Schwingungsverhalten eingehalten werden. Eine zusätzliche bauordnungsrechtliche Abweichung war für die ausgeführte Konstruktion nicht erforderlich.

Für die industrielle Fertigung wurde ein vorläufiger Zielpreis von 3 bis 5 Euro je Lehmeinhangstein beziehungsweise etwa 200 bis 350 Euro je Kubikmeter angesetzt. Für die Primärkonstruktion aus Balken, Lehmeinhangsteinen und Trägerplatte wurde ein Richtwert von rund 250 Euro je Quadratmeter ermittelt; ein abschließendes Kostenmodell für den vollständigen Deckenaufbau lag im Projektzeitraum nicht vor. Zusätzliche Aufwände entstanden durch den erstmaligen Produktionslauf, die Entwicklung des Strangpressmundstücks, die Integration einer Schälvorrichtung für die sichtbare Steinunterseite und die Nachbearbeitung einzelner Steine auf der Baustelle. Bei wiederholter Anwendung können diese Entwicklungsaufwände reduziert werden. Wirtschaftliche Potenziale liegen insbesondere in der Skalierung der Produktion und der Standardisierung von Steingeometrie, Toleranzen und Anschlussdetails. Eine unmittelbare Kostenvergleichbarkeit mit etablierten Massiv- oder Holzdeckensystemen ist aufgrund des Forschungs- und Entwicklungscharakters bislang nur eingeschränkt möglich.

3.1.6 Bauteilübergreifende Zusammenfassung der Ergebnisse

Bauteilentwicklung, Prototyping und bauliche Umsetzung

Die fünf Bauteile wurden ausgehend von unterschiedlichen konstruktiven und technologischen Entwicklungsständen in das Bauvorhaben überführt. Die Holz-Bodenplatte und die Gebäudeabschlusswand konnten weitgehend auf bestehenden Prozessen des seriellen Holzbaus und der werkseitigen Vorfertigung aufbauen. Bei den Re-Use-Fundamenten, dem vorgefertigten Lehmsteinmauerwerk und der Holz-Lehm-Hybriddecke mussten dagegen neue beziehungsweise wesentlich angepasste Verfahren der Materialqualifizierung, Elementierung, Fertigung, Logistik und Montage entwickelt werden.

Entsprechend unterschied sich auch die Funktion des Prototypings. Bei den Re-Use-Fundamenten, dem Lehmsteinmauerwerk und der Holz-Lehm-Hybriddecke diente das Prototyping je nach Bauteil der praktischen Über-

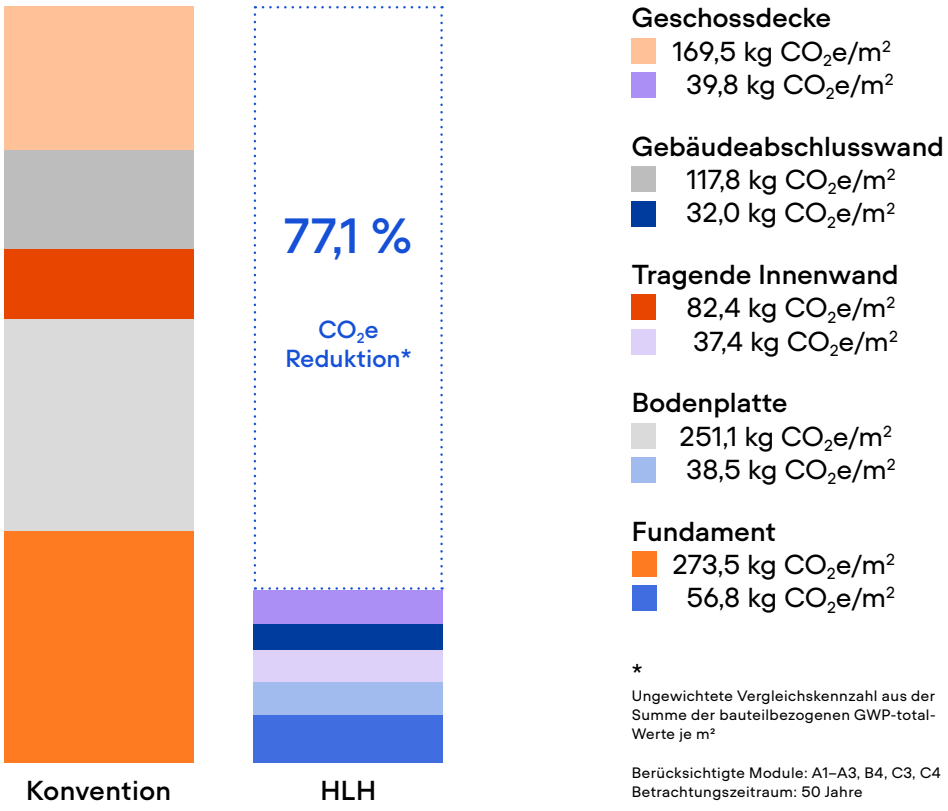
prüfung von Materialverhalten, Fügung, Maßhaltigkeit, Handhabung und Montage. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in die weitere Planung zurückgeführt und führten zu Anpassungen der Geometrien, Verbindungen, Toleranzen und Ausführungsabläufe. Bei der Holz-Bodenplatte und der Gebäudeabschlusswand erfolgte die konstruktive Überprüfung dagegen vor allem im Rahmen der Ausführungsplanung, der werkseitigen Vorfertigung und der baulichen Montage; die angefertigten Demonstratoren dienten hier insbesondere der Dokumentation und Vermittlung der entwickelten Aufbauten.

Bauteilübergreifend erwiesen sich die Abstimmung konstruktiver Schnittstellen, die Koordination unterschiedlicher Fertigungsprozesse sowie die Berücksichtigung von Maßtoleranzen, Transportbedingungen und Montagefolgen als zentrale Anforderungen der Umsetzung. Sämtliche entwickelten Bauteile konnten in den realen Bauablauf integriert und baulich ausgeführt werden. Neben den realisierten Konstruktionen liegen damit dokumentierte Entwicklungs-, Fertigungs- und Umsetzungsprozesse vor, die eine Grundlage für weitere Anwendungen und Optimierungen bilden.

Ökologische Ergebnisse

In der ungewichteten, bauteilübergreifenden Vergleichsbetrachtung wurde gegenüber den konventionellen funktionalen Äquivalenten eine Reduktion des summierten GWP-total um 77,1 % erreicht. Alle entwickelten Bauteile unterschreiten den GWP-total-Wert der jeweiligen Vergleichskonstruktion deutlich. Die bauteilspezifischen Reduktionen liegen zwischen rund 55 % beim tragenden Lehmsteinmauerwerk und rund 85 % bei der Holz-Bodenplatte. Die Kennzahl dient der vergleichenden Einordnung der unter-

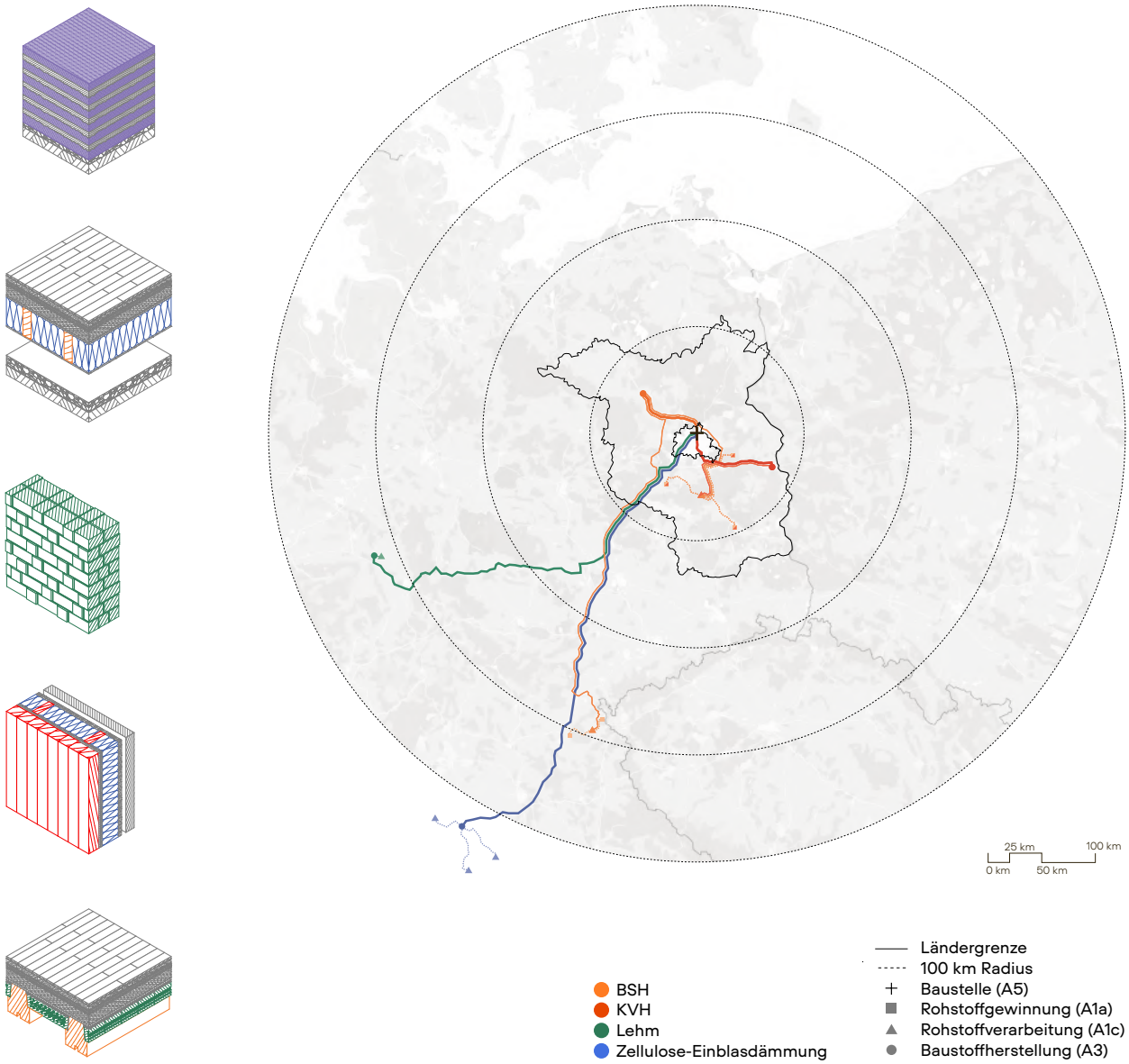
Abb. 9:
GWP-total im Vergleich: HLH und Konvention. Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.

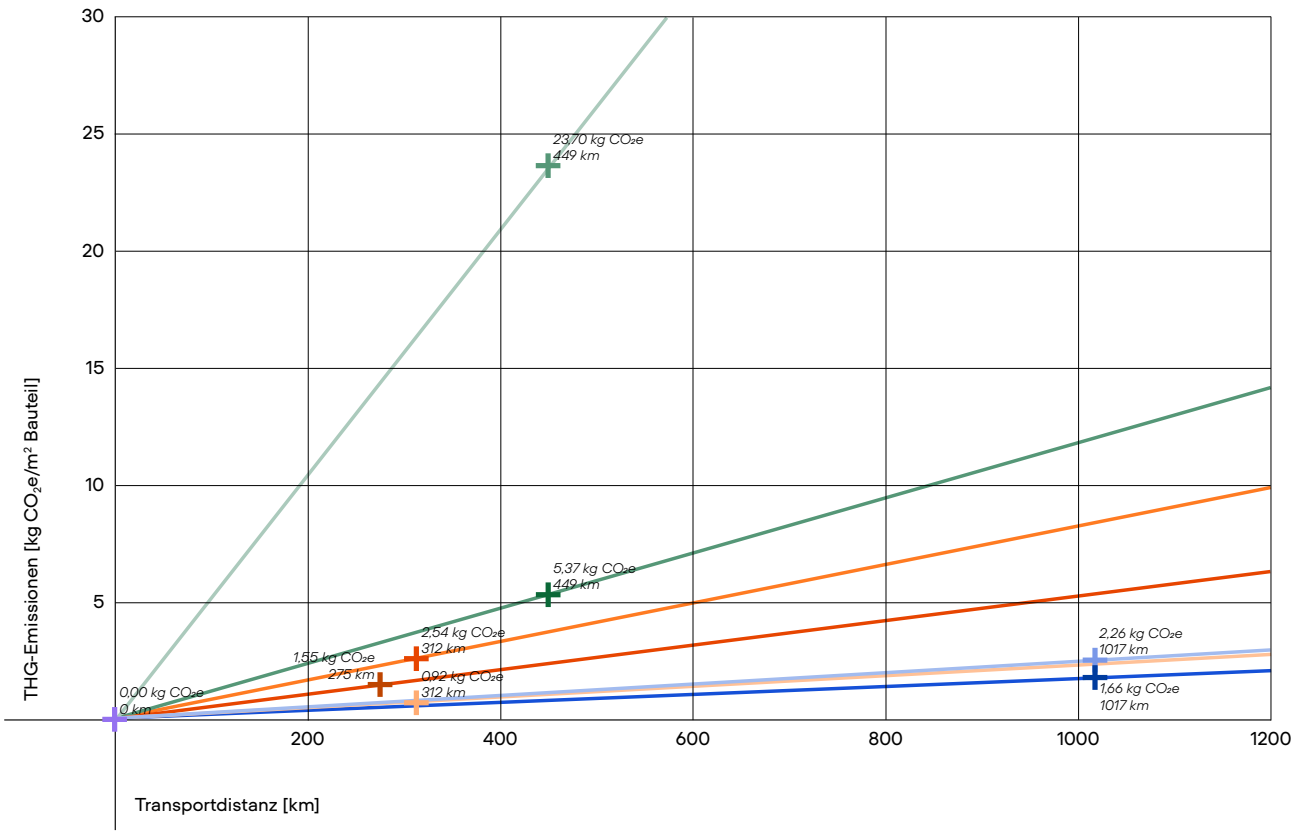


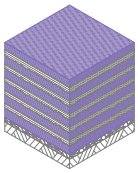
suchten Bauteile und stellt keine flächengewichtete Gesamtbilanz des Gebäudes dar. Maßgeblich für die Reduktionen sind der Ersatz emissionsintensiver mineralischer Konstruktionen durch biobasierte und ungebrannte Baustoffe sowie die direkte Wiederverwendung vorhandener Betonbauteile.

Die Transportanalyse zeigt, dass transportbedingte Emissionen nicht allein von der Lieferdistanz, sondern vom Zusammenwirken von Transportweg, Rohdichte und Materialmenge bestimmt werden. Bezogen auf das jeweilige GWP-total reichen die projektspezifisch ermittelten Transportemissionen von rund 8 % bei der Holz-Bodenplatte bis zu 63 % beim tragenden Lehmsteinmauerwerk; die Gebäudeabschlusswand liegt bei rund 10 %, die Holz-Lehm-Hybriddecke bei rund 20 %. Während leichte faserbasierte Dämmstoffe trotz langer Transportwege vergleichsweise moderate Werte aufweisen, beeinflussen die Lieferketten massiver Lehmbaustoffe die Bauteilbilanz aufgrund der hohen Materialmengen wesentlich. Für den wiederverwendeten Bestandsbeton der Re-Use-Fundamente entstanden durch die unmittelbare Wiederverwendung auf dem Grundstück keine zusätzlichen

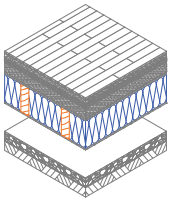
Abb. 10:
Materialherkünfte und Transportwege der Primärmaterialien. Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.



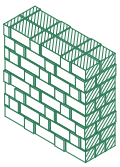




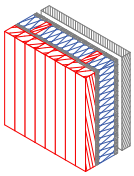
Re-Use-Fundament — **0,00 kg CO_2e/m^2**
- Re-Use-Beton — 0,00 kg CO_2e/m^2 bei 0 km



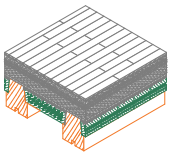
Holz-Bodenplatte — **3,18 kg CO_2e/m^2**
- Zellulosedämmung — 2,26 kg CO_2e/m^2 bei 1017 km
- BSH Träger — 0,92 kg CO_2e/m^2 bei 312 km



Tragendes Lehmsteinmauerwerk — **23,70 kg CO_2e/m^2**
- Lehmstein — 23,70 kg CO_2e/m^2 bei 449 km



Holz-Gebäudeabschlusswand — **3,21 kg CO_2e/m^2**
- Zellulosedämmung — 1,66 kg CO_2e/m^2 bei 1017 km
- KVH — 1,55 kg CO_2e/m^2 bei 275 km



Holz-Lehm-Hybriddecke — **7,91 kg CO_2e/m^2**
- Lehmeinhangstein — 5,37 kg CO_2e/m^2 bei 449 km
- BSH Träger — 2,54 kg CO_2e/m^2 bei 312 km

Abb. 11:
Transportdistanzen und -emissionen der Primärmaterialien. Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.

externen Transportemissionen.

Auch die Zirkularitätsbewertung fällt bei allen entwickelten Bauteilen höher aus als bei den jeweiligen konventionellen funktionalen Äquivalenten. Die HLH-Bauteile erreichen Gesamtwerte zwischen 43,9 und 71,5 Punkten, während die Vergleichskonstruktionen zwischen 14,4 und 28,2 Punkten liegen. Besonders positiv wirken sich lösbare beziehungsweise trockene Fügungen, sortenreine Materialsysteme und das Wiederverwendungspotenzial der tragenden Holzbauteile aus. Einschränkungen ergeben sich insbesondere durch Folien sowie verklebte oder mineralisch gebundene Plattenwerkstoffe.

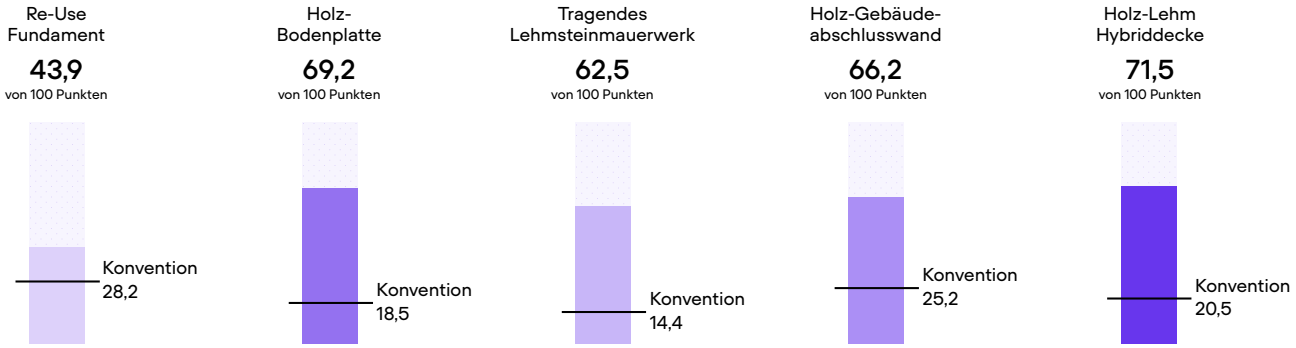


Abb. 12:
Zirkularität im Vergleich - HLH und Konvention. Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde.

Technologische, ökonomische und regulatorische Ergebnisse

Als technologische Ergebnisse liegen neben den ausgeführten Konstruktionen auch konkrete Produktions- und Prozesslösungen vor. Dazu zählen die Qualifizierung und Katalogisierung des Bestandsbetons, die Vorfertigung tragender Lehmwandsegmente, die industrielle Serienproduktion ungebrannter Lehmeinhangsteine im Strangpressverfahren sowie die projektspezifische Anpassung bestehender Holzbausysteme. Der technologische Entwicklungsaufwand lag damit je nach Bauteil entweder in der Entwicklung neuer Herstellungs- und Umsetzungsprozesse oder in der Weiterentwicklung bestehender Systeme für die Anforderungen des Bauvorhabens.

Die realisierten Konstruktionen konnten überwiegend innerhalb bestehender normativer und bauordnungsrechtlicher Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Die Re-Use-Fundamente erforderten eine projektspezifische Qualifizierung des Bestandsbetons und eine darauf aufbauende statische Bemessung. Für die Gebäudeabschlusswand wurde aufgrund der brennbaren Ausführung mit sichtbaren Holzoberflächen eine brandschutztechnische Abweichung beantragt und genehmigt. Die Holz-Bodenplatte, das tragende Lehmsteinmauerwerk und die ausgeführte Holz-Lehm-Hybriddecke konnten ohne zusätzliche bauordnungsrechtliche Abweichungen realisiert werden.

Eine unmittelbare Vergleichbarkeit der im Projekt entstandenen Kosten mit konventionellen Bauweisen war nur eingeschränkt möglich. Neben den bauteilbezogenen Herstellungs- und Materialkosten entstanden zusätzliche Aufwände für Materialprüfung, Planung, Nachweisführung, Prototyping, Produktionsanpassung, Logistik und Schnittstellenkoordination. Ein Teil dieser Aufwände ist auf die erstmalige Entwicklung und Umsetzung unter Forschungsbedingungen zurückzuführen. Zugleich konnten bestehende

Fertigungs-, Kompetenz- und Kooperationsstrukturen der Projektpartner genutzt werden. Als übergreifende Herausforderung zeigte sich insbesondere bei bislang wenig etablierten Bauweisen die begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Ausführungsunternehmen und belastbarer marktüblicher Vergleichswerte.

3.2 Arbeitspaket 2: Bauforschung und Monitoring

Innerhalb des Projektzeitraums wurden die Messstrategie bauteilbezogen konkretisiert, die wesentlichen Messpunkte verortet und erste Untersuchungen durchgeführt. Der Umsetzungsstand unterscheidet sich entsprechend den baulichen Voraussetzungen und den erforderlichen Beobachtungszeiträumen. Während für die funktionale Sicherheit bereits alle erforderlichen Nachweise und Prüfungen vorliegen, setzen belastbare Aussagen zur raumklimatischen und energetischen Performance sowie zum langfristigen hygrothermischen Verhalten den luftdichten Gebäudeabschluss, die Inbetriebnahme und eine kontinuierliche Datenerfassung über die Jahreszeiten hinweg voraus. Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind daher überwiegend als Ausgangswerte und Funktionsnachweise des Monitoringsystems zu verstehen.

3.2.1 Funktionale Sicherheit und Bauteilverhalten

Die Eignung der Re-Use-Fundamente für die vorgesehene tragende Wiederverwendung wurde vor der baulichen Umsetzung durch die materialtechnische Prüfung des Bestandsbetons und die darauf aufbauende statische Bemessung nachgewiesen. Diese Nachweise bildeten die Grundlage für die funktionale Sicherheit der ausgeführten Fundamentkörper. Ein gesondertes Langzeitmonitoring des Setzungsverhaltens wurde daher nicht durchgeführt.

An der Holz-Bodenplatte und der Gebäudeabschlusswand wurden die installierten Feuchtedetektoren bereits während der Innenausbauphase erstmals ausgelesen. An den erfassten Messstellen wurde zum Zeitpunkt der Auslesung kein Feuchteeintrag detektiert. Die Ergebnisse stellen eine erste Funktionskontrolle der konstruktiv sensiblen Bereiche dar. Hinweise auf außergewöhnliche Feuchtebeanspruchungen oder konstruktiv bedingte Auffälligkeiten lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung also nicht vor. Eine Bewertung des langfristigen Feuchteverhaltens erfordert die kontinuierliche Erfassung unter wechselnden Außenklimabedingungen und im regulären Gebäudebetrieb.

Weiterführende Auswertungen der relativen Luftfeuchte im Kriechkeller, in der Gebäudefuge und in den angrenzenden Räumen waren innerhalb des Projektzeitraums aufgrund des noch ausstehenden luftdichten Gebäudeabschlusses und der fehlenden regulären Nutzung noch nicht möglich. Entsprechend liegt bislang keine belastbare Zeitreihe zur saisonalen Feuchtebeanspruchung der Holzbauteile vor. Die installierte Sensorik schafft jedoch die Voraussetzung, künftig kritische Feuchtezustände frühzeitig zu erkennen und die jeweiligen Innen- und Außenklimabedingungen in Beziehung zu setzen.

3.2.2 Baubiologische und innenraumklimatische Qualität

Die Untersuchung der baubiologischen und innenraumklimatischen Qualität umfasste sowohl materialbezogene Laboruntersuchungen als auch Messungen der Raumluftqualität. Ausgewählte Holz-, Lehm- und Ausbauprodukte wurden mittels VOC-Analytik und ergänzender zellbiologischer Untersuchungen bewertet. Die vollständigen Prüfberichte sind als technische Anlagen TA 02-1 und TA 02-2 beigefügt.

Im Projektzeitraum wurden VOC-Messungen zur Untersuchung der Raumluftqualität durchgeführt. Gegenstand der Messungen waren insbesondere Emissionen aus den sichtbaren Holzoberflächen und den weiteren eingesetzten Baustoffen. Die Untersuchungen erfolgten gemäß DIN EN ISO 16000-3 und DIN EN ISO 16000-6 [DIN16000-3, DIN16000-6] und umfassten die Bestimmung von TVOC, Formaldehyd, ausgewählten VOC-Einzelstoffen, Aldehyden sowie niederen Carbonsäuren. Die Analytik wurde durch ein nach DIN EN ISO/IEC 17025 [DIN17025] akkreditiertes Labor durchgeführt. Die erste Messung erfolgte am 18.12.2025 im Rohbauzustand der gewählten Raumkubatur. Für den untersuchten Gebäudebereich wurde ein TVOC-Wert von 1.097,8 µg/m³ sowie eine Formaldehydkonzentration von 18 µg/m³ ermittelt. Sämtliche Richtwerte II des Umweltbundesamtes [AIR26] wurden eingehalten. Der Richtwert I für Alpha-Pinen von 500 µg/m³ wurde mit 520 µg/m³ geringfügig überschritten; für die Summe bicyclischer Terpene besteht in der aktuellen Richtwerttabelle des Umweltbundesamtes kein Summenrichtwert. Unter Berücksichtigung des damaligen Ausbauzustands wurden die Messwerte durch den Gutachter insgesamt als niedrig eingeordnet. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass während des Messvorgangs eine provisorische raumlufttechnische Anlage betrieben wurde, deren Zuluft aus einem Vorraum beziehungsweise Baustellenbereich angesaugt wurde, wodurch eine Beeinflussung der gemessenen Konzentrationen nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

Im Rahmen einer zweiten Messreihe am 09.04.2026 wurden sowohl Messungen unter konservativen Bedingungen nach etwa acht Stunden Verschlusszeit als auch nach etwa einer Stunde Verschlusszeit zur Annäherung an spätere Nutzungsbedingungen durchgeführt. Dabei wurden deutlich erhöhte TVOC-Konzentrationen von 7.348,9 µg/m³ beziehungsweise 4.529,3 µg/m³ festgestellt. Gleichzeitig stiegen die Konzentrationen typischer holzassoziierter Terpene deutlich an. Besonders hervorzuheben sind Alpha-Pinen mit Konzentrationen von 2.800 µg/m³ beziehungsweise 1.800 µg/m³, 3-Caren mit 2.900 µg/m³ beziehungsweise 1.700 µg/m³ sowie die Summe der Terpene mit 6.660 µg/m³ beziehungsweise 4.053 µg/m³. Für Alpha-Pinen wurden sowohl der Richtwert I als auch der Richtwert II überschritten. Zudem überschritt die Summe der Alkanale C4–C11 bei der Messung nach achtstündiger Verschlusszeit den Richtwert I.

Die festgestellten Stoffmuster entsprechen nach Einschätzung des Sachverständigen überwiegend den für Nadelholz, Holzwerkstoffe und Holzfaserdämmstoffe charakteristischen Emissionen. Die erhöhten Konzentrationen von Hexanal, Pentanal und Nonanal werden als typische Oxidationsprodukte von Holz und natürlichen Ölen eingeordnet. Der erstmalige Nachweis von Pentanonoxim deutet darüber hinaus auf Emissionen aus oxidativ trocknenden Beschichtungen hin, die nach der ersten Messung durch den begonnenen Innenausbau eingebracht wurden.

Für die Einordnung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass beide Messreihen während der Bauphase und damit nicht unter regulären Nutzungsbedingungen durchgeführt wurden. Die teilweise verlängerten Verschlusszeiten, unterschiedlichen Ausbauzustände und veränderten Lüftungsbedingungen beeinflussten die gemessenen Konzentrationen. Die Stoffmuster lassen sich nach Einschätzung des Sachverständigen überwiegend holztypischen Emissionen sowie den im Innenausbau eingebrachten Materialien und Beschichtungen zuordnen. Die Messungen dokumentieren daher zunächst die Emissionssituation unterschiedlicher Bauphasen. Eine Bewertung der raumlufthygienischen Qualität im regulären Gebäudebetrieb erfordert weitere Messungen nach Fertigstellung unter definierten Lüftungs- und Nutzungsbedingungen. Der vollständige Prüfbericht zur Innenraumluftqualität ist als technische Anlage TA 02-3 beigefügt.

Die kontinuierliche Erfassung von Raumtemperatur, relativer Luftfeuchte und CO_2-Konzentration konnte aufgrund des noch nicht abgeschlossenen Innenausbaus und des fehlenden regulären Gebäudebetriebs noch nicht aufgenommen werden. Gleiches gilt für die hygrothermische Untersuchung des tragenden Lehmsteinmauerwerks und die Bewertung der hygroskopischen Feuchtepufferung sowie der thermischen Speicherwirkung der eingesetzten Lehmbaustoffe.

Im Zuge des zweiten Messaufbaus wurden zusätzlich orientierende Messungen weiterer innenraumhygienischer Parameter durchgeführt. Die Radon-Kurzzeitmessung ergab einen Maximalwert von 24 Bq/m³ und lag damit deutlich unterhalb des nationalen Referenzwertes von 300 Bq/m³ [BFS26]. Die Feinstaubkonzentrationen wurden als unauffällig eingestuft. Ebenso wurden für Stickstoffdioxid lediglich geringe Konzentrationen erfasst.

3.2.3 Energieeffizienz und Umweltwirkung im Betrieb

Für die Bewertung des operativen Energieverbrauchs und der thermischen Gebäudeperformance lagen innerhalb des Projektzeitraums noch keine auswertbaren Betriebsdaten vor. Die hierfür erforderliche Datenerhebung setzt die Fertigstellung, die Inbetriebnahme und eine reguläre Nutzung des Gebäudes voraus.

Die vorgesehene Betriebsphase soll eine Gegenüberstellung der operativen Energiekennwerte mit den materialbezogenen Treibhausgasemissionen ermöglichen. Damit wird die bislang auf Herstellung, Konstruktion und Lieferketten konzentrierte ökologische Bewertung um die tatsächliche Performance des Gebäudes im Betrieb erweitert. Erst durch die Verknüpfung von Herstellungs- und Nutzungsphase kann die Gesamtwirkung der entwickelten Bauweisen über den Lebenszyklus hinweg bewertet werden.

3.2.4 Fortführung des Monitorings

Die innerhalb des Projektzeitraums durchgeführten Untersuchungen bilden den Ausgangspunkt für eine längerfristige Datenerfassung. Im Rahmen des geplanten Langzeitmonitorings sollen weitere Messpunkte in Betrieb genommen und erste zusammenhängende Zeitreihen zu Bauteilfeuchte, Raumklima und Raumluftqualität aufgebaut werden. Dazu zählen insbesondere:

- die kontinuierliche Erfassung der Feuchteverhältnisse in Bodenplat-

te, Kriechkeller und Gebäudeabschlusswand,
- vergleichende Raumklimamessungen in Bereichen mit unterschiedlichen Holz- und Lehmbauteilen,
- die Auswertung der VOC-Messungen und ergänzende Messungen von CO_2 und relativer Luftfeuchte,
- die Erfassung hygrothermischer Profile im Lehmsteinmauerwerk und in der Holz-Lehm-Hybriddecke,
- bauakustische Untersuchungen der Holz-Lehm-Hybriddecke im fertiggestellten Gebäude sowie
- die Erfassung des operativen Energieverbrauchs nach Aufnahme der regulären Nutzung.

Belastbare Aussagen zur Feuchteregulierung, zur thermischen Speicherwirkung und zum sommerlichen Raumklima erfordern eine Beobachtung über mehrere vollständige Witterungs- und Nutzungszyklen. Eine weiterführende Bauforschung sollte daher mindestens zwei Sommerperioden sowie die dazwischenliegenden Heizperioden erfassen. Dadurch können kurzfristige Einzelmessungen in kontinuierliche Zeitreihen überführt und die reale Performance der Konstruktionen unter wechselnden klimatischen und nutzungsbedingten Einflüssen bewertet werden. Auf dieser Grundlage lassen sich robuste Aussagen zur Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und raumklimatischen Wirksamkeit der entwickelten Holz-, Lehm- und Re-Use-Konstruktionen ableiten.

Das langfristige Monitoring bildet damit die inhaltliche Fortsetzung der bauteilbezogenen Entwicklung und ökologischen Bewertung. Es erweitert die bislang vorliegenden Erkenntnisse zur Herstellung und baulichen Umsetzung um empirische Daten zur Dauerhaftigkeit, Innenraumqualität und energetischen Performance im realen Gebäudebetrieb. Gleichzeitig schafft es die Grundlage, die im Forschungsprojekt entwickelten Annahmen unter realen Nutzungsbedingungen zu überprüfen und die Ergebnisse für die Bewertung und Weiterentwicklung zukünftiger Anwendungen nutzbar zu machen.

3.3 Arbeitspaket 3: Projektbegleitung und Kommunikation

Die projektbegleitende Kommunikation entwickelte sich parallel zum Forschungs- und Baufortschritt. In der frühen Projektphase standen der fachliche Austausch innerhalb der Forschungsgemeinschaft, die kontinuierliche Dokumentation des Entwicklungsprozesses sowie die Entwicklung von Transferstrategien im Vordergrund. Mit der Konkretisierung der Bauteile und ihrer Umsetzung im Bauvorhaben verlagerte sich der Schwerpunkt zunehmend auf die Vermittlung der erzielten Ergebnisse an ein breites Fachpublikum.

Über die gesamte Projektlaufzeit entstand ein aufeinander abgestimmtes Spektrum aus Vorträgen, Fachveranstaltungen, wissenschaftlichen und redaktionellen Beiträgen, Baustellenbesuchen und Ausstellungen. Die Kommunikation umfasste dabei sowohl die entwickelten Konstruktionen als auch die im Projekt angewandte Methodik des Reallabors, die ökologische Bewertung sowie das Monitoringkonzept. Neben den einzelnen Projektergebnissen wurden auch die zugrunde liegenden Bewertungsmethoden, Entscheidungsprozesse, Zielkonflikte und Umsetzungserfahrungen im Kontext

regenerativer und kreislauffähiger Bauweisen vermittelt.

Ein wesentlicher Bestandteil des Arbeitspakets war die grafische, räumliche und sprachliche Aufbereitung der Forschungsergebnisse. Komplexe technische und ökologische Zusammenhänge wurden in einheitliche Grafiken, Bauteildarstellungen, vergleichende Diagramme, Modelle, Materialproben und Demonstratoren übersetzt. Dadurch konnten die Ergebnisse über unterschiedliche Formate hinweg konsistent vermittelt und sowohl für spezialisierte Fachkreise als auch für ein breiteres bauinteressiertes Publikum zugänglich gemacht werden. Besondere Bedeutung kam dabei der Übersetzung abstrakter Bewertungsgrößen wie Treibhausgasemissionen, Zirkularität oder Transportaufwand in unmittelbar nachvollziehbare bauliche und materielle Zusammenhänge zu.

3.3.1 Veranstaltungen und Vor-Ort-Formate

Das Forschungsvorhaben wurde im Projektzeitraum in unterschiedlichen Veranstaltungs-, Lehr- und Austauschformaten vorgestellt. Diese richteten sich an Akteur*innen aus Architektur und Planung, Bauwirtschaft und Baustoffindustrie, Wissenschaft und Lehre, Wohnungswirtschaft, Politik, Stiftungswesen und öffentlicher Verwaltung. Die Formate ermöglichten es, die Projektergebnisse in unterschiedliche fachliche Zusammenhänge einzuordnen und zugleich Rückmeldungen aus den jeweiligen Anwendungsfeldern in den weiteren Projektverlauf aufzunehmen. Die Vielfalt der Formate verdeutlicht den interdisziplinären Charakter des Forschungsvorhabens sowie die Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse für unterschiedliche Handlungsfelder entlang der Wertschöpfungskette des Bauens.

Ein erstes umfangreicheres Vor-Ort-Format fand im November 2024 mit dem Besuch von rund 40 Studierenden des Bauingenieurwesens der TU Dresden statt. Die Baustellentour verband Erläuterungen zum Forschungsvorhaben mit Einblicken in die industrielle Vorfertigung der Holzbauteile und die baupraktische Umsetzung. Die Gliederung in mehrere thematische Stationen ermöglichte eine unmittelbare Verknüpfung von Forschung, Planung, Herstellung und Baustelle.

Mit fortschreitender baulicher Umsetzung gewann das Gebäude selbst zunehmend als Ort des Wissenstransfers an Bedeutung. Die Grundsteinlegung im Juli 2025, weitere Baustellenführungen und das Richtfest im März 2026 machten die entwickelten Konstruktionen unmittelbar am realisierten Bauteil nachvollziehbar. Dadurch konnten Fragen zu Materialwahl, Vorfertigung, Fügung, Bauablauf und den projektspezifischen Herausforderungen direkt mit unterschiedlichen Zielgruppen diskutiert werden.

Den zentralen öffentlichen Abschluss des Forschungsvorhabens bildete im Mai 2026 die Ausstellung „FORSCHEN, FORMEN, TRANSFORMIEREN“ am Holz-Lehmbau Campus Berlin. Modelle, Demonstratoren, Materialproben, Pläne, Analyseergebnisse und Baustellendokumentationen führten die Entwicklung der fünf Innovationsbauteile mit den übergeordneten Ergebnissen zu Lebenszyklusanalyse, Zirkularität, Regionalität und Monitoring zusammen. Die vollständig ausgebuchten Führungen und die breite Resonanz der Eröffnung verdeutlichten das hohe Interesse an der praktischen Umsetzung regenerativer und kreislauffähiger Bauweisen. Die fachlichen Nachfragen konzentrierten sich insbesondere auf Materialverfügbarkeit, Skalierbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsprozesse und Langzeitper-

formance und machten zugleich bestehende Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sichtbar.

Weitere Fachvorträge, unter anderem beim Konvent der Baukultur 2026 der Bundesstiftung Baukultur, ordneten das Vorhaben in aktuelle Debatten um Ressourcenverbrauch, Baukultur und die Transformation der Baupraxis ein. Parallel gingen fortlaufend Anfragen für Gebäudebesichtigungen und Baustellenführungen von Hochschulen, Unternehmen, Wohnungsbauakteur*innen und Stiftungen ein. Eine vollständige chronologische Übersicht der durchgeführten Veranstaltungen, Vorträge und Publikationen ist in Anhang D zusammengestellt.

3.3.2 Publikationen und Fachbeiträge

Die wissenschaftliche Aufbereitung der Forschungsergebnisse erfolgte zunächst am Beispiel der Holz-Lehm-Hybriddecke. Der Beitrag „From Vertical to Horizontal: Earth Blocks in Floor Plate Constructions“ [Gäth25] wurde im Rahmen der Sustainable Built Environment Conference 2025 an der ETH Zürich vorgestellt. Die Publikation dokumentiert die konstruktive Entwicklung, das Prototyping und die vergleichende Lebenszyklusanalyse des Deckensystems. Darüber hinaus beschreibt sie die Übertragung der Lehmsteinproduktion auf einen industriellen Maßstab und ordnet die entwickelte Konstruktion gegenüber konventionellen sowie weiteren emissionsreduzierten Deckensystemen ein. Damit wurden zentrale Ergebnisse des Vorhabens in den internationalen wissenschaftlichen Diskurs eingebracht und konnten zugleich im Kontext aktueller Forschungsarbeiten zu biobasierten und materialeffizienten Bauweisen diskutiert werden.

Ein ausführlicher Fachbeitrag in der Deutschen BauZeitschrift DBZ [JW26] bereitete das Gesamtvorhaben für ein breites planungs- und baubezogenes Fachpublikum auf. Der Beitrag verknüpft den Reallabor-Ansatz mit den entwickelten Bauteilen und behandelt die Materialstrategie, die ökologische Bewertung, regionale Wertschöpfungs- und Transportketten sowie das projektbegleitende Monitoring.

Ergänzend wurden die Projektfortschritte über die Kommunikationskanäle der Projektpartner*innen und projektbezogene Informationsmaterialien verbreitet. Kurze Projektvorstellungen vermittelten die übergeordnete Material- und Forschungsstrategie, während vertiefende Beiträge einzelne Bauteile, Bewertungsmethoden oder Prozessschritte behandelten.

3.3.3 Ergebnisaufbereitung und zielgruppenspezifischer Wissenstransfer

Der Wissenstransfer wurde innerhalb und außerhalb des Projektverbunds auf mehreren Ebenen organisiert. Die etwa im dreimonatigen Rhythmus durchgeführten Forschungskolloquien dienten der gemeinsamen Aufbereitung der jeweiligen Arbeitsstände, der fachübergreifenden Diskussion und der Abstimmung der weiteren Entwicklungsschritte. Das kontinuierlich aktualisierte Projektkommuniqué stellte den beteiligten Partner*innen eine gemeinsame inhaltliche Grundlage für Publikationen, Präsentationen und weitere Kommunikationsmaßnahmen zur Verfügung.

Für den externen Wissenstransfer wurden Inhalte und Vermittlungstiefe an die jeweiligen Zielgruppen angepasst. Wissenschaftliche Publikationen richteten sich an Forschung und Hochschulen, Fachbeiträge an Planung, Ausführung und Baustoffindustrie. Baustellenführungen ermöglichten den

unmittelbaren Austausch mit Wohnungswirtschaft, Bauunternehmen, Verwaltung und potenziellen Anwender*innen. Die Ausstellung verband die fachliche Dokumentation mit einem räumlich und materiell erfahrbaren Zugang und erreichte damit auch Besucher*innen außerhalb spezialisierter Fachkreise.

Als besonders wirksam erwies sich die Verbindung des realisierten Bauwerks mit Demonstratoren im Maßstab 1:1, Modellen und vergleichenden Analysen. Konstruktive Lösungen konnten dadurch unmittelbar am Bauteil erläutert und mit den Ergebnissen der ökologischen und zirkulären Bewertung verknüpft werden. Zugleich ließen sich nicht nur die realisierten Lösungen, sondern auch die zugrunde liegenden Entwicklungsprozesse, Umsetzungsbedingungen und Schnittstellen nachvollziehbar vermitteln.

Die Vielzahl externer Anfragen und Einladungen, die hohe Auslastung der Führungen sowie die fortlaufenden Anfragen nach Vorträgen und Gebäudebesichtigungen belegen eine über den ursprünglichen Projektkreis hinausreichende Resonanz. Das Vorhaben erreichte damit relevante Akteur*innen aus Baupraxis, Forschung, Lehre, Politik und Förderwesen. Die aufbereiteten Ergebnisse stehen als Grundlage für weitere Bauvorhaben, Lehr- und Weiterbildungsformate sowie die Fortführung des Monitorings und der fachlichen Kommunikation zur Verfügung.

4 Diskussion

4.1 Zielerreichung und Abweichungen vom geplanten Vorhaben

Die im Vorhaben formulierten Ziele konnten in wesentlichen Teilen erreicht werden. Für fünf konstruktiv und ökologisch relevante Bauteile wurden regenerative Lösungen entwickelt, vergleichend bewertet und unter realen Planungs-, Produktions-, Genehmigungs- und Baustellenbedingungen umgesetzt. Damit liegt für alle untersuchten Bauteile eine gebaute Anwendung vor. Dies bestätigt ihre grundsätzliche technische und baupraktische Umsetzbarkeit und zeigt zugleich, dass regenerative Bauweisen innerhalb bestehender Rahmenbedingungen realisiert werden können, wenn Forschung, Planung, Herstellung und Ausführung frühzeitig zusammengeführt werden.

Die iterative Entwicklung führte in mehreren Fällen zu Anpassungen gegenüber den ursprünglichen Entwurfsständen. Diese betrafen insbesondere die Elementierung und Geometrie einzelner Bauteile, die Abstimmung unterschiedlicher Herstellungsverfahren, die Ausbildung von Maßtoleranzen sowie einzelne Ausführungsabläufe. Die Änderungen ergaben sich aus der prototypischen Erprobung, der industriellen Fertigung und der baulichen Umsetzung. Sie sind damit als wesentlicher Bestandteil des Erkenntnisprozesses im Reallabor einzuordnen.

Aufgrund der verzögerten Fertigstellung und Inbetriebnahme des Gebäudes konnten die Untersuchungen der Bauteile im regulären Gebäudebetrieb innerhalb der Projektlaufzeit nur teilweise durchgeführt werden. Die Sensorik wurde teilweise bereits installiert, erste Funktionskontrollen wurden vorgenommen und erste VOC-Messungen durchgeführt. Belastbare Aussagen zum langfristigen Feuchteverhalten, zur Innenraumluftqualität, zur thermischen und hygrischen Wirkung der Lehmbauteile, zur Bauakustik und zum operativen Energieverbrauch setzen jedoch einen fertiggestellten und regulär genutzten Gebäudezustand sowie längere Beobachtungszeiträume voraus. Die vorliegenden Ergebnisse bilden daher eine belastbare Ausgangsbasis für die Fortführung des Monitorings, erlauben aber noch keine abschließende Bewertung der Langzeitperformance der entwickelten Konstruktionen.

Die Ziele der Projektkommunikation und des Wissenstransfers konnten durch die kontinuierliche Dokumentation und Aufbereitung der Ergebnisse sowie durch Publikationen, Fachveranstaltungen, Führungen und die abschließende Ausstellung erreicht werden. Das hohe fachliche Interesse und die fortlaufenden Anfragen nach Vorträgen und Gebäudebesichtigungen zeigen zugleich, dass der Transfer der Projektergebnisse über die eigentliche Projektlaufzeit hinaus fortgeführt werden sollte.

4.2 Bauteilübergreifende Einordnung der Ergebnisse

Die bauteilbezogenen Ergebnisse werden im Folgenden übergreifend eingeordnet und hinsichtlich ihrer ökologischen, technologischen, ökonomi-

schen und regulatorischen Bedeutung diskutiert. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass regenerative Bauteile nicht allein über die Substitution einzelner Baustoffe bewertet werden können. Ihre Leistungsfähigkeit entsteht vielmehr aus dem Zusammenwirken von Materialwahl, Materialmenge, Herkunft, Herstellungsweise, konstruktiver Fügung, technischer Umsetzbarkeit und langfristiger Nutzungsfähigkeit.

Lebenszyklusanalyse, Transportanalyse und Zirkularitätsbewertung erfassen dabei komplementäre ökologische Aspekte. Die technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung erweitert diese Betrachtung um die Voraussetzungen, unter denen die entwickelten Lösungen praktisch umgesetzt, wiederholt angewendet und in größere Produktions- und Bauzusammenhänge übertragen werden können. Erst in der Verbindung dieser Perspektiven werden sowohl die Potenziale der untersuchten Konstruktionen als auch bestehende Zielkonflikte und Hemmnisse sichtbar.

4.2.1 Ökologische Einordnung

Vergleichende Lebenszyklusanalyse

Die projektbegleitende Anwendung der bauteilbezogenen Lebenszyklusanalyse verdeutlicht ihr hohes Potenzial als Entscheidungsgrundlage im Entwurf. Ökologische Auswirkungen können zu einem Zeitpunkt eingeordnet werden, an dem Materialwahl und konstruktive Aufbauten noch veränderbar sind. Damit dieses Potenzial wirksam wird, muss die Methode auch ohne vertiefte Fachexpertise im Entwurfsprozess anwendbar sein und Planende direkt einbeziehen.

Für belastbare Entwurfsentscheidungen ist zugleich eine Betrachtung über die reine Herstellungsphase hinaus erforderlich. Eine isolierte Bilanzierung der Module A1–A3 bildet weder Ersatzprozesse während der Nutzungsphase noch das Lebensende der Materialien ab und kann insbesondere bei biobasierten Baustoffen aufgrund der biogenen Kohlenstoffspeicherung zu missverständlichen Ergebnissen führen. Problematisch ist dabei weniger die Berücksichtigung der biogenen Kohlenstoffspeicherung selbst als ihre unmittelbare Verrechnung mit den Herstellungs- und Verarbeitungsemissionen zu einem einzigen Netto-Wert. Beide Größen beschreiben unterschiedliche und zeitlich versetzte Klimawirkungen: Während die Emissionen der Herstellung unmittelbar freigesetzt werden, ist die Speicherung biogenen Kohlenstoffs zunächst zeitlich begrenzt und von der tatsächlichen Nutzungsdauer, einer möglichen Wiederverwendung und dem weiteren Lebensweg des Materials abhängig. Durch die Zusammenfassung der Werte können Herstellungs- und Verarbeitungsemissionen vom rechnerischen Speicherwert überlagert werden und stark negative Bilanzwerte entstehen, obwohl damit keine dauerhafte Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre verbunden ist. Die verursachten Emissionen, die gespeicherte Kohlenstoffmenge und die angenommene Speicherdauer sollten daher getrennt ausgewiesen und erst anschließend in ihrem zeitlichen Zusammenhang bewertet werden.

Die Aussagekraft der Ergebnisse wird darüber hinaus durch die verfügbare Datengrundlage bestimmt. Sofern für die im Projekt eingesetzten Baustoffe keine produktspezifischen Umweltinformationen zur Verfügung standen, wurden vergleichbare generische Datensätze verwendet. Insbesondere bei Lehmbaustoffen können generische Datensätze die Klimawirkung deutlich überschätzen, wenn sie eine energieintensive technische Trocknung

statt der tatsächlichen Lufttrocknung ansetzen [GK23]. Dadurch blieb eine vergleichende und normbezogene Bewertung der Bauteile möglich, auch wenn die tatsächlichen Umweltwirkungen der konkret eingesetzten Produkte nur näherungsweise abgebildet werden konnten. Eine breitere Verfügbarkeit produktspezifischer Datensätze würde die Genauigkeit und Aussagekraft zukünftiger Bewertungen entsprechend erhöhen.

Die bauteilübergreifende Auswertung diente vor allem dem Vergleich der fünf entwickelten Bauteile mit ihren konventionellen funktionalen Äquivalenten. Auf Grundlage der je Quadratmeter Bauteilfläche ermittelten GWP-total-Werte konnte die prozentuale Minderung der Treibhausgasemissionen vergleichend ausgewiesen werden. Da die Bauteilwerte anschließend ohne Gewichtung nach den tatsächlich im Gebäude ausgeführten Flächen zusammengeführt wurden, stellt die resultierende Kennzahl keine Gesamtbilanz des realisierten Gebäudes dar.

Regionalität und Transportemissionen

Die vertiefte Analyse der projektspezifischen Transportemissionen zeigt, dass die ökologische Wirkung von Transporten nicht allein anhand der Lieferdistanz bewertet werden kann. Ausschlaggebend ist vielmehr das Zusammenwirken von Transportweg, Transportmittel, Rohdichte und eingesetzter Materialmenge. Leichte, faserbasierte Baustoffe können daher auch bei langen Lieferwegen vergleichsweise moderate Emissionswerte aufweisen, während bei massiven Baustoffen bereits mittlere Distanzen einen wesentlichen Anteil an der Bauteilbilanz erreichen können.

Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei den Lehmbauteilen. Der geringe Energieaufwand der ungebrannten Herstellung wird durch die hohe eingebrachte Materialmasse und die projektspezifische Lieferdistanz teilweise relativiert. Die ökologische Qualität von Lehm wird damit nicht allein durch den vermiedenen Brennprozess bestimmt, sondern wesentlich auch durch seine Einbindung in regionale Rohstoff-, Produktions- und Wertschöpfungsketten. Die Nutzung qualitätsgesicherter lokaler Aushubmaterialien kann den Transportaufwand und den Bedarf an Primärrohstoffen reduzieren und zugleich regionale Stoffkreisläufe stärken. Für die daraus hergestellten Lehmbaustoffe bestehen normative Anforderungen und Prüfverfahren, die vorgelagerte Erfassung, Charakterisierung, Aufbereitung und Qualitätssicherung heterogener Aushubmaterialien ist jedoch bislang nicht als durchgängiger standardisierter Prozess etabliert.

Die Analyse verweist zugleich auf ein grundlegendes Transparenzdefizit entlang bestehender Lieferketten. Bereits bei Konstruktionsholz ist die konkrete Rohstoffherkunft aufgrund der Bündelung unterschiedlicher Herkünfte in Sägewerken und weiterverarbeitenden Betrieben häufig nur eingeschränkt nachvollziehbar. Bei Holzwerkstoffen und Verbundprodukten nimmt diese Unschärfe durch zusätzliche Rohstoffe und Verarbeitungsschritte weiter zu. Eine vollständige Erfassung aller Materialherkünfte und Transportwege wäre daher mit erheblichen Unsicherheiten verbunden gewesen.

Verlässliche Herkunftsnachweise, produktspezifische Lieferkettendaten und eine durchgängige Dokumentation sind daher wesentliche Voraussetzungen, um Herkunft und Transportwirkungen künftig bereits bei Materialwahl und Beschaffung belastbar berücksichtigen zu können.

Zirkularität

Die projektbegleitende Betrachtung der Zirkularität hat gezeigt, dass die verfügbaren Bewertungsansätze bislang nur begrenzt als Entwurfswerkzeuge einsetzbar sind. Der DGNB-Gebäuderessourcenpass, der im Projekt als methodische Grundlage der Zirkularitätsbewertung diente, ist primär auf die nachgelagerte Dokumentation eines bereits geplanten oder umgesetzten Gebäudes ausgerichtet. Für die frühe Bauteilentwicklung braucht es hingegen einfach anwendbare Instrumente, die Materialherkunft, Rückbaubarkeit, werkstoffliche Trennbarkeit und Wiederverwendungspotenzial unmittelbar in Variantenentscheidungen einbeziehen und schon im Planungsprozess abgebildet werden können.

Kreislauffähige Bauweisen entstehen nicht allein durch die Wahl einzelner Materialien. Rückbaubarkeit und sortenreine Trennung hängen wesentlich von der konstruktiven Fügung ab. Verbindungen und Verbindungsmittel müssen daher bereits in der Bauteilentwicklung berücksichtigt werden. Gleichzeitig zeigen die untersuchten Konstruktionen, dass einzelne zur Erfüllung bauphysikalischer und brandschutztechnischer Anforderungen eingesetzte Schichten und Bauprodukte die Zirkularität der Gesamtsysteme begrenzen können. Dies betrifft insbesondere Folien für Feuchte- und Luftdichtheit sowie verklebte oder mineralisch gebundene Plattenwerkstoffe, deren sortenreine Trennung und Wiederverwendung nur eingeschränkt möglich ist.

Eine Unschärfe der Bewertungsmethode zeigt sich beim Kriterium der Materialherkunft. Nicht erneuerbare Primärrohstoffe werden dort unabhängig von ihrer tatsächlichen Ressourcenverfügbarkeit einheitlich mit null Punkten bewertet. Damit wird regional vielerorts verfügbarer Lehm ebenso eingeordnet wie Rohstoffe mit einem deutlich höheren Verknappungsrisiko. Die Nutzung lokal anfallenden Aushublehms stellt zugleich eine naheliegende Weiterentwicklung dar, um den Einsatz primärer Rohstoffe weiter zu reduzieren. Zwar werden Sekundärrohstoffe in der Bewertungslogik grundsätzlich berücksichtigt, Aushublehm lässt sich den vorgesehenen Kategorien der Wieder- und Weiterverwendung jedoch nicht eindeutig zuordnen. Für eine genauere Bewertung sollte das Kriterium der Materialherkunft daher sowohl stärker nach der tatsächlichen Ressourcenverfügbarkeit nicht erneuerbarer Primärrohstoffe unterscheiden als auch Aushub- und Reststoffe eindeutiger erfassen.

Die Re-Use-Fundamente verdeutlichen darüber hinaus, dass Zirkularität nicht allein durch Material- und Bauteileigenschaften bestimmt wird, sondern funktionierende Prüf-, Dokumentations- und Logistikprozesse voraussetzt. Die direkte Wiederverwendung am Standort vermeidet zusätzliche Transporte und Zwischenlagerungen. Der hohe planerische und logistische Aufwand der erstmaligen Anwendung zeigt zugleich, dass für eine breitere Umsetzung standardisierte Prüf- und Nachweisverfahren, digitale Bauteilkataloge sowie verlässliche Rückbau-, Lagerungs- und Wiedereinbauprozesse erforderlich sind.

Bei den Holzkonstruktionen liegt das zentrale Potenzial zunächst in einer möglichst langen Nutzungs-, Anpassungs- und Reparaturfähigkeit. Lösbare Verbindungen, konstruktiver Feuchteschutz und eine belastbare Bauteildokumentation schaffen die Voraussetzung, die Primärkonstruktion über mehrere Nutzungsphasen und damit potenziell über den in der Lebens-

zyklusanalyse angesetzten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren hinaus zu erhalten. Zirkularität bedeutet damit nicht die möglichst frühe Wiederverwendung einzelner Bauteile, sondern zunächst die langfristige Anpassungs- und Nutzungsfähigkeit des gesamten Gebäudes. Die weitgehend voneinander unabhängige Organisation von Tragstruktur, Ausbau und technischer Gebäudeausrüstung ermöglicht es, auf veränderte Nutzungsanforderungen zu reagieren, ohne die Primärkonstruktion grundlegend verändern zu müssen. Das Gebäude ist damit nicht auf eine einzelne Nutzung festgelegt, sondern kann unterschiedliche Nutzungsphasen und Umnutzungen aufnehmen. Erst nach einer möglichst langen Primärnutzung können die dokumentierten und lösbar gefügten Bauteile in weitere Wiederverwendungskreisläufe überführt werden. Die mehrfache bauteilhafte Nutzung verlängert zugleich die Dauer der biogenen Kohlenstoffspeicherung und reduziert den Bedarf an neuem Konstruktionsholz. Gebäude können dadurch über lange Zeiträume als temporäre Kohlenstoffspeicher wirken, sofern die Bauteile dauerhaft genutzt und wiederverwendet werden und die Holzentnahme den Zuwachs nachhaltig bewirtschafteter Wälder nicht übersteigt [Chu20].

4.2.2 Technologische, ökonomische und regulatorische Einordnung

Technologische Einordnung

Die unterschiedlichen Entwicklungswege der fünf Bauteile zeigen, dass technologische Skalierbarkeit je nach Ausgangslage unterschiedliche Voraussetzungen hat. Während bei den Holzbauteilen vor allem bestehende Systeme an projektspezifische Anforderungen angepasst wurden, müssen die für die Re-Use-Fundamente und die neu entwickelten Lehmbauteile erprobten Qualifizierungs-, Fertigungs- und Montageprozesse zunächst in robuste und wiederholbare Abläufe überführt werden. Entscheidend ist dabei nicht allein die grundsätzliche Funktionsfähigkeit einer Konstruktion, sondern auch die Standardisierbarkeit von Geometrien, Fertigungsschritten, Toleranzen, Anschlussdetails und Montageabläufen.

Insbesondere bei hybriden Konstruktionen erwies sich die frühzeitige Abstimmung unterschiedlicher Produktionssysteme als wesentlich. Die Ausführung der Holz-Lehm-Hybriddecke verdeutlichte, dass sich bereits geringe Maßabweichungen verschiedener Fertigungsprozesse kumulieren können und daher durch toleranzrobuste Details berücksichtigt werden müssen.

Ein wesentliches Potenzial liegt in der Nutzung und Anpassung bestehender industrieller Infrastrukturen. Die Herstellung der ungebrannten Lehmsteine im Strangpressverfahren zeigt, dass neue naturbasierte Produkte in vorhandene Produktionsanlagen integriert werden können. Vergleichbares gilt für die Weiterentwicklung bestehender Holzbausysteme. Skalierung erfordert damit nicht zwingend neue Produktionsstrukturen, sondern häufig die gezielte Anpassung vorhandener Verfahren und ihre Verknüpfung mit neuen Material- und Konstruktionsansätzen.

Als übergreifende Voraussetzung für die Übertragbarkeit erwies sich die Koordination zwischen Entwurf, Fachplanung, Materialherstellung, Vorfertigung, Logistik und Montage. Die technologische Innovationsleistung liegt daher nicht allein im jeweiligen Bauteil, sondern ebenso in den entwickelten Schnittstellen und Umsetzungsprozessen.

Ökonomische Einordnung

Eine unmittelbare Vergleichbarkeit der im Projekt entstandenen Kosten mit konventionellen Bauweisen ist nur eingeschränkt möglich. Neben den bauteilbezogenen Material- und Herstellungskosten umfassten die Projektkosten Materialprüfungen, Nachweisführung, Produktionsanpassungen, zusätzliche Planungs- und Koordinationsleistungen sowie die projektbegleitende Forschung. Ein Teil dieser Aufwände ist als einmalige Entwicklungsleistung einzuordnen und lässt sich nicht unmittelbar auf wiederholte Anwendungen übertragen. Die vorliegenden Kennwerte stellen daher projektspezifische beziehungsweise orientierende Größen und keine marktüblichen Herstellungskosten dar.

Die bauteilbezogenen Ergebnisse zeigen, dass ein wesentlicher Teil der wirtschaftlichen Mehraufwände aus der erstmaligen Entwicklung und Integration der Konstruktionen in den Bauprozess resultierte. Maßgeblich waren insbesondere geringe Stückzahlen, fehlende Erfahrungswerte, erhöhte Prüf- und Nachweisanforderungen sowie zusätzliche Abstimmungen zwischen Planung, Produktion und Ausführung. Bei den Re-Use-Fundamenten verlagerte sich der Aufwand von der Materialbeschaffung auf Bestandsaufnahme, Qualifizierung, statische Zuordnung, Dokumentation und Baustellenlogistik. Bei den Lehmbauteilen entstanden zusätzliche Aufwände vor allem durch Produktentwicklung, Vorfertigung, Sichtqualitätsanforderungen und die Anpassung industrieller Herstellungsverfahren.

Eine weitere Herausforderung liegt in der begrenzten Verfügbarkeit geeigneter Ausführungsunternehmen. Für innovative und bislang wenig verbreitete Bauweisen stehen häufig nur wenige Marktakteure mit entsprechenden Erfahrungen und Referenzen zur Verfügung. Dies kann zu Risikozuschlägen, zurückhaltender Angebotsabgabe oder einer Ausführung auf Stundenlohnbasis führen. Die wirtschaftlichen Hemmnisse resultieren damit teilweise weniger aus der technischen Komplexität als aus dem wahrgenommenen Projektrisiko.

Mit zunehmender Standardisierung, wiederholter Anwendung und Integration in reguläre Produktions- und Bauprozesse können entwicklungs- und koordinationsbedingte Aufwände voraussichtlich reduziert werden. Voraussetzungen hierfür sind standardisierte Prüf- und Nachweisverfahren, reproduzierbare Bauteilgeometrien und Anschlussdetails, belastbare Referenzprojekte sowie eine wachsende Zahl qualifizierter Marktakteure. Dadurch können sowohl die Kostensicherheit als auch die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit regenerativer und zirkulärer Bauweisen verbessert werden.

Regulatorische Einordnung

Die realisierten Konstruktionen konnten überwiegend innerhalb der bestehenden normativen und bauordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Die Anforderungen unterschieden sich jedoch entsprechend dem Innovationsgrad, der Bauart und der sicherheitsrelevanten Funktion der jeweiligen Bauteile. Entscheidend war, ob belastbare Material- und Produktkennwerte sowie geeignete Prüf- und Nachweisverfahren vorlagen. Bei wiederverwendeten Bauteilen und erhöhten brandschutztechnischen Anforderungen waren ergänzend projektspezifische Qualifizierungen beziehungsweise Abweichungen erforderlich.

Deutlichere regulatorische Grenzen zeigten sich bei im Projekt nicht umgesetzten visionären Bauteilen. Dazu zählen tragend wirksame Lehmeinhangsteine in horizontalen Bauteilen, wiederverwendete tragende Holzbauteile sowie alternative naturbasierte Produkte mit hohen brandschutztechnischen Anforderungen. Für diese Anwendungen fehlen teilweise produktspezifische Kennwerte, Verwendbarkeitsnachweise, Zulassungen und normativ etablierte Bemessungsansätze.

Für eine breitere Anwendung sind standardisierte Prüf- und Nachweisverfahren, eine stärkere normative Verankerung sowie eine Erweiterung der verfügbaren Produkt- und Bauteildaten erforderlich. Regulatorische Weiterentwicklung bedeutet dabei keine Absenkung der Sicherheitsanforderungen, sondern die Überführung projektspezifisch erbrachter Nachweise in allgemein anwendbare und reproduzierbare Verfahren.

4.3 Bedeutung des Reallabor-Ansatzes, Übertragbarkeit und Grenzen

Der Reallabor-Ansatz ermöglichte es, die entwickelten Konstruktionen nicht isoliert, sondern innerhalb des vollständigen Bauprozesses zu erproben. Forschung, Entwurf, Fachplanung, Materialherstellung, Vorfertigung, Genehmigung und Ausführung wurden dabei unmittelbar miteinander verknüpft. Das Bauwerk wurde so zum realen Prüfstand, an dem planerische Annahmen, technische Lösungen und ökologische Zielsetzungen im Maßstab 1:1 überprüft und bei auftretenden Abweichungen in den Entwicklungsprozess zurückgeführt werden konnten. Sichtbar wurden dadurch nicht nur die technische Funktionsfähigkeit der Bauteile, sondern ebenso die organisatorischen, logistischen und kommunikativen Voraussetzungen ihrer Umsetzung.

Die Übertragbarkeit der Projektergebnisse liegt daher nicht ausschließlich in den ausgeführten konstruktiven Lösungen. Ebenso übertragbar sind die entwickelten Verfahren zur Materialqualifizierung, die Abstimmung unterschiedlicher Produktionssysteme, der Umgang mit Toleranzen und Schnittstellen, die projektspezifische Nachweisführung sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Diese Erkenntnisse sind auch dann auf andere Bauvorhaben übertragbar, wenn sich Gebäudetypologie, Materialverfügbarkeit oder regionale Produktionsbedingungen unterscheiden.

Ein einzelnes Demonstrationsvorhaben kann die Voraussetzungen für eine breitere Anwendung schaffen, diese jedoch nicht allein gewährleisten. Skalierung entsteht erst durch wiederholte Anwendung, Vereinfachung und Überprüfung unter unterschiedlichen typologischen, regionalen und wirtschaftlichen Bedingungen. Weitere Pilot- und Demonstrationsprojekte sind daher notwendig, um projektspezifische Lösungen schrittweise in verlässliche Planungsroutinen, standardisierte Nachweise, belastbare Kostenmodelle und etablierte Produktionsabläufe zu überführen.

Die Aussagekraft der Ergebnisse ist zugleich durch die spezifischen Rahmenbedingungen des Vorhabens begrenzt. Dazu zählen teilweise fehlende produktspezifische Umweltinformationen, nur eingeschränkt nachvollziehbare Lieferketten, unterschiedliche Tiefen der bauteilbezogenen Kostenbewertung sowie das noch ausstehende Langzeitmonitoring. Diese Einschränkungen mindern den Wert der gebauten Referenz nicht, sondern

benennen präzise die Bereiche, in denen weiterer Forschungs-, Standardisierungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Der Holz-Lehmbau Campus Berlin schafft damit mehr als eine Katalogisierung innovativer Einzelbauteile. Er bildet eine belastbare Referenz dafür, wie regenerative und zirkuläre Bauweisen unter realen Bedingungen entwickelt, nachgewiesen und umgesetzt werden können. Reallabore dieser Art sind eine wesentliche Voraussetzung, um technische Innovationen aus dem Projektmaßstab in eine verlässliche und breit anwendbare Baupraxis zu überführen.

5 Fazit und Ausblick

Der Holz-Lehmbau Campus Berlin zeigt, dass regenerative Baustoffe bereits heute unter realen Planungs-, Genehmigungs- und Bauausführungsbedingungen eingesetzt werden können. Die fünf realisierten Bauteile belegen die technische Machbarkeit der entwickelten Konstruktionen und machen zugleich sichtbar, wo weiterhin Hemmnisse bestehen.

Eine wirksame Bauwende muss jedoch über die Substitution einzelner Materialien hinausgehen. Ebenso entscheidend sind deren Einbettung in bioregionale Stoff- und Wertschöpfungszusammenhänge, die Anschlussfähigkeit an bestehende Herstellungs- und Produktionsinfrastrukturen sowie zirkuläre Konstruktionsweisen, die Rückbau, Trennung und Wiederverwendung ermöglichen. Darüber hinaus setzt die Entwicklung und Umsetzung solcher Lösungen neue Formen der Zusammenarbeit voraus. Der Reallabor-Ansatz des HLCB verband interdisziplinäre Zusammenarbeit mit einem iterativen Vorgehen und der Bereitschaft, Abweichungen und Fehlversuche als Erkenntnisse in die weitere Entwicklung zurückzuführen. Diese Arbeitsweise war für die realisierten Lösungen ebenso entscheidend wie die eingesetzten Materialien.

Der zentrale Erkenntnisgewinn des Vorhabens liegt daher nicht allein in den realisierten Bauteillösungen, sondern vor allem in der entwickelten, auf weitere Vorhaben übertragbaren Projektmethodik. Sie verbindet Materialqualifizierung, ökologische Bewertung, prototypische Erprobung, bauliche Integration, Monitoring und Wissenstransfer zu einem iterativen Entwicklungsprozess, in dem Annahmen im Maßstab 1:1 überprüft und Erkenntnisse aus der Ausführung unmittelbar in die weitere Planung zurückgeführt werden. Die Übertragung der entwickelten Ansätze auf weitere Bauvorhaben setzt jedoch Rahmenbedingungen voraus, die derzeit noch nicht durchgängig gegeben sind. Die wesentlichen Hemmnisse liegen weniger in der grundsätzlichen technischen Machbarkeit als in fehlenden normativen Grundlagen und Verwendbarkeitsnachweisen, begrenzter Produktverfügbarkeit, bislang nicht etablierten Liefer- und Wertschöpfungsketten sowie fehlenden Routinen in Planung und Ausführung.

Ein einzelnes Demonstrationsvorhaben kann die Voraussetzungen für eine breitere Anwendung schaffen, diese jedoch nicht allein gewährleisten. Erforderlich sind weitere Pilotprojekte, in denen die entwickelten Lösungen unter anderen typologischen, regionalen und wirtschaftlichen Bedingungen erprobt, vereinfacht und schrittweise in reguläre Planungs-, Produktions- und Bauabläufe überführt werden.

Ebenso entscheidend sind belastbare Daten aus dem Betrieb realisierter Gebäude. Mit dem installierten Monitoring wird die Untersuchung daher über den Projektabschluss hinaus fortgesetzt. Die langfristige Auswertung des Feuchte- und Temperaturverhaltens der Bauteile, der Innenraumluftqualität und des Energieverbrauchs unter realen Nutzungsbedingungen ermöglicht es, offene Fragen zu klären und die fachliche Argumentationsgrundlage für die breitere Anwendung regenerativer Bauweisen zu stärken.

Aus den Projektergebnissen ergeben sich insbesondere folgende Weiterentwicklungsbedarfe:

- die Fortführung des Langzeitmonitorings zu Feuchteverhalten, Innenraumluftqualität und operativem Energieverbrauch über mindestens zwei vollständige Witterungs- und Nutzungszyklen;
- die Weiterentwicklung einfach anwendbarer, entwurfstauglicher vergleichender und bauteilbezogener Lebenszyklusanalysen und Zirkularitätsbewertungen;
- die qualitätsgesicherte Erschließung lokaler Aushubmaterialien als Lehm-Sekundärrohstoff zur Reduktion von Transportemissionen und Primärrohstoffbedarf;
- die Weiterentwicklung normativer Grundlagen, von Zulassungsverfahren sowie standardisierter Nachweisführungen für kreislauffähige, regenerative und wiederverwendete Bauprodukte und Bauteilsysteme;
- der Aufbau und die Vernetzung regionaler Ausführungsbetriebe, Wissensträger*innen sowie Wertschöpfungs- und Produktionsstrukturen für biobasierte Baustoffe, Lehmbaustoffe und Re-Use-Bauteile;
- weitere Pilotvorhaben in anderen Gebäudetypologien und regionalen Kontexten, um die erprobten Prozesse in standardisierte und reproduzierbare Bauroutinen zu überführen.

A. Wissenschaftliche Publikationen und Literatur

[Ber21] BERGMANN, M.; SCHÄPKE, N.; MARG, O. u. a.: Transdisciplinary sustainability research in real-world labs: success factors and methods for change. In: Sustainability Science 16 (2021), S. 541–564. DOI: 10.1007/s11625-020-00886-8.
[Chu20] CHURKINA, G.; ORGANSCHI, A.; REYER, C. P. O. u. a.: Buildings as a global carbon sink. In: Nature Sustainability 3 (2020), Nr. 4, S. 269–276. DOI: 10.1038/s41893-019-0462-4.
[Elh20] ELHACHAM, E. u. a.: Global human-made mass exceeds all living biomass. In: Nature 588 (2020), S. 442–444. DOI: 10.1038/s41586-020-3010-5.
[Gäth25] GÄTH, C. u. a.: From Vertical to Horizontal: Earth Blocks in Floor Plate Constructions. In: Sustainable Built Environment Conference 2025 (SBE25), Zürich, 2025. DOI: 10.1088/1755-1315/1554/1/012077.
[GK23] GÄTH, C.; KRETSCHMANN, M.: Gepresste Lehmsteine - Perspektiven für eine post-fossile Erde. Masterthesis, Technische Universität Berlin, 2023.
[GSR25] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GlobalABC): Not Just Another Brick in the Wall: The Solutions Exist – Scaling Them Will Build on Progress and Cut Emissions Fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. United Nations Environment Programme, Nairobi, 2025.
[GSR26] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GlobalABC): Building Fast. Falling Short. Global Status Report for Buildings and Construction 2025-2026. United Nations Environment Programme, Paris, 2026.
[JW26] JEGLITSCH, P.; WOLF, C.: Transformation der Baustelle. In: Deutsche BauZeitschrift (DBZ). 2026. URL: https://www.dbz.de/artikel/transformation-der-baustelle-4388742.html (Abgerufen am: 09.06.2026).
[MLEUV25] MINISTERIUM FÜR LAND- UND ERNÄHRUNGSWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG: Bericht zur Lage der Forstwirtschaft 2022 bis 2024. Potsdam, 2025.
[Ree07] REED, B.: Shifting from 'sustainability' to regeneration. In: Building Research & Information 35 (2007), Nr. 6, S. 674–680. DOI: 10.1080/09613210701475753.
[SK12] SCHMIED, M.; KNÖRR, W.: Carbon Footprint – Teilgutachten „Monitoring für den CO2-Ausstoß in der Logistikkette“. Texte 29/2012, Forschungskennzahl 3709 45 139, UBA-FB 001582. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012.
[UNEP21] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP): Catalysing Science-based Policy Action on Sustainable Consumption and Production: The Value-Chain Approach and Its Application to Food, Construction and Textiles. United Nations Environment Programme, Nairobi, 2021.

B. Normen und technische Regelwerke

[DIN12390-3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 12390-3:2019-10. Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin: DIN Media, 2019.
[DIN12504-1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 12504-1:2021-02. Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 1: Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit. Berlin: DIN Media, 2021.
[DIN15643] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 15643:2021-12. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken. Berlin: DIN Media, 2021.
[DIN15804] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 15804:2022-03. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Berlin: DIN Media, 2022.
[DIN15978] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN 15978:2012-10. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Berlin: DIN Media, 2012.
[DIN16000-3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 16000-3:2023-12. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Bestimmung von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in Innenraum- und Prüfkammerluft. Berlin: DIN Media, 2023.
[DIN16000-6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO 16000-6:2022-03. Innenraumluft – Teil 6: Bestimmung organischer Verbindungen in Innenraum- und Prüfkammerluft mittels aktiver Probenahme auf Sorptionsröhrchen, Thermodesorption und Gaschromatografie. Berlin: DIN Media, 2022.
[DIN17025] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03. Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Berlin: DIN Media, 2018.
[DIN18940] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN 18940:2023-06. Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung. Berlin: DIN Media, 2023.
[DIN68800-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN 68800-2:2022-02. Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: DIN Media, 2022.
[ISO20887] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): ISO 20887:2020. Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works – Design for Disassembly and Adaptability – Principles, Requirements and Guidance. Genf: ISO, 2020.

C. Bewertungsmethoden, Datenbanken und Richtwerte

[AIR26] AUSSCHUSS FÜR INNENRAUMRICHTWERTE: Festgelegte Richtwerte für die Innenraumluft. Version 2026.01, Stand: 04.05.2026. URL: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/4031/bilder/dateien/Richtwertliste_AIR_DE_2026.01_2026-05-04_1.pdf (Abgerufen am: 28.07.2026).
[BFS26] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS): Vorschriften für Gebäude und Arbeitsplätze – Referenzwert für Radon. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/regelungen/referenzwert.html (Abgerufen am 28.07.2026).
[CPX] CONCULAR: Circularity Performance Index (CPX) – Methodik zur quantitativen Bewertung der Zirkularität von Bauteilen und Gebäuden. URL: https://concular.de/circularity-performance-index/ (Abgerufen am 28.07.2026).
[DGNB23] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN (DGNB): Gebäuderessourcenpass. Vollständige Fassung. Version 1.0. Stuttgart, März 2023. URL: https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass (Abgerufen am: 28.07.2026).
[ELCA] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR): eLCA – Bauteileditor für die Ökobilanzierung. Version 0.9.7. URL: https://www.bauteileditor.de/ (Abgerufen am: 28.07.2026).
[LEVELS] DODD, N.; DONATELLO, S.; CORDELLA, M.: Level(s) indicator 2.4: Design for deconstruction. User manual: introductory briefing, instructions and guidance. Publication version 2.0. European Commission, Joint Research Centre, 2021. URL: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-11/UM3_Indicator_2.4_v.2.0_clean_20.07.2021.pdf (Abgerufen am 05.06.2026).
[OEK] BUNDESMINISTERIUM FÜR WOHNEN, STADTENTWICKLUNG UND BAUWESEN (BMWSB): ÖKOBAUDAT 2024_A2 – Datensätze gemäß DIN EN 15804+A2 auf Basis von ecoinvent-Hintergrunddaten. Informationsportal Nachhaltiges Bauen. URL: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db3.html#bereich3 (Abgerufen am 28.07.2026).

Anhang A

Bauteilbezogene Ergebnisdokumentation

Re-Use-Fundamente

Holz-Bodenplatte

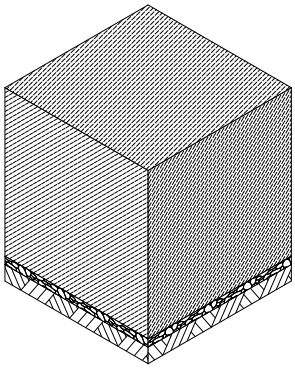
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

Holz-Gebäudeabschlusswand

Holz-Lehm-Hybriddecke

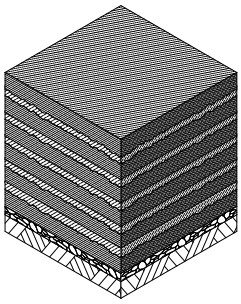
Konstruktiver Vergleich
Re-Use-Fundamente

*
Die Optimierungsschritte konnten im Projekt noch nicht umgesetzt werden, da Zuschnitt, Kategorisierung und Einbau gestufter wiederverwendeter Betonelemente einen hohen logistischen und baulichen Zusatzaufwand erfordern.



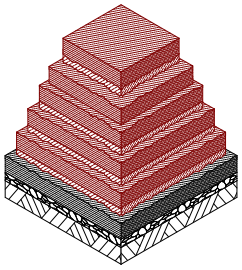
Konvention

Beton, unbewehrt	1000 mm
Sauberkeitsschicht	70 mm
Erdreich	



HLH

Re-Use-Betontplatten, unbewehrt	600 mm
RC-Beton (Typ 1, 45% RC-Anteil)	200 mm
RC-Gesteinskörnung, ungebunden	50 mm
Erdreich	



Vision*

Re-Use-Betonplatten, unbewehrt (-40%)	600 mm
RC-Beton Typ 1, 45% RC-Anteil, (-40%)	200 mm
RC-Gesteinskörnung, ungebunden	50 mm
Erdreich	

Vergleichende Lebenszyklusanalyse
Re-Use-Fundamente

Konvention

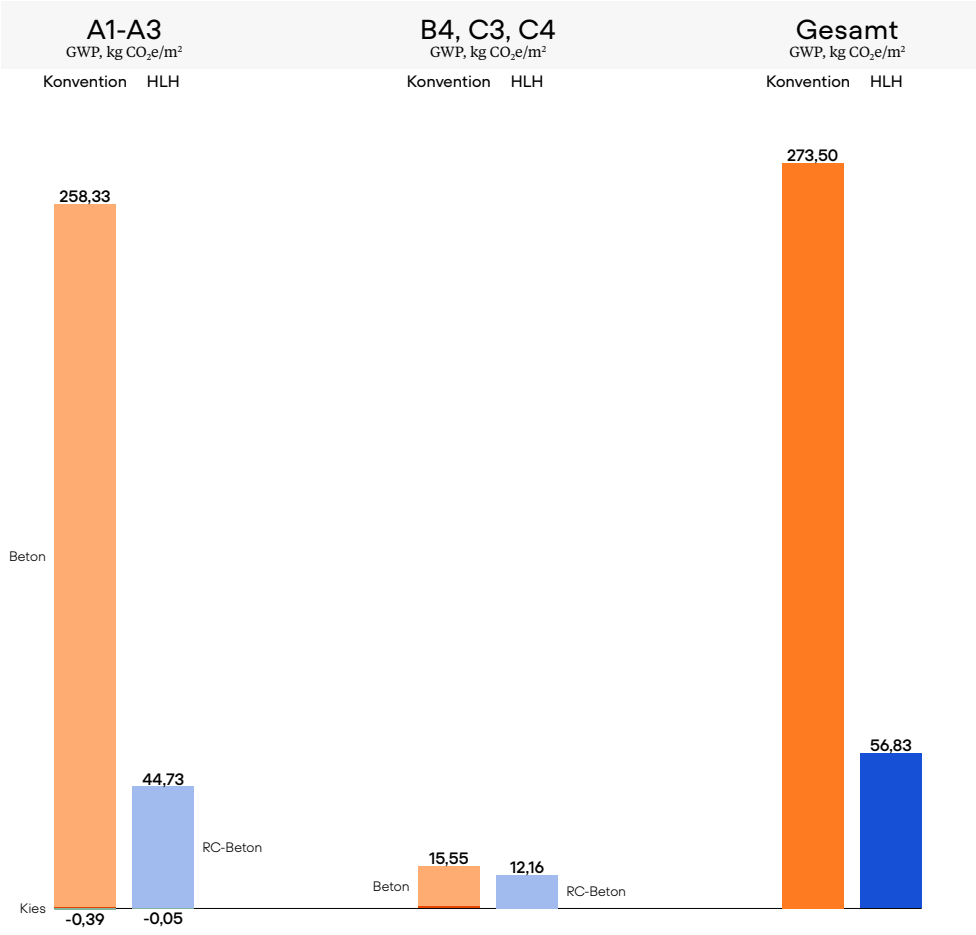
Treibhausgasemissionen, fossil GWP-fossil, kg CO_2e/m^2	Treibhausgasemissionen, gesamt GWP-total, kg CO_2e/m^2
273,88	**273,50**

Kohlenstoffspeicherfähigkeit GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,39

HLH

Treibhausgasemissionen, fossil GWP-fossil, kg CO_2e/m^2	Treibhausgasemissionen, gesamt GWP-total, kg CO_2e/m^2
56,89	**56,83**

Kohlenstoffspeicherfähigkeit GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,05



Zirkularitätsbewertung
Re-Use-Fundamente

85,7

Materialherkunft
+ höchste Bewertung durch direkte Wiederverwendung
- Open-Loop-Recycling bei RC-Fundament und RC-Gesteinskörnung

25,0

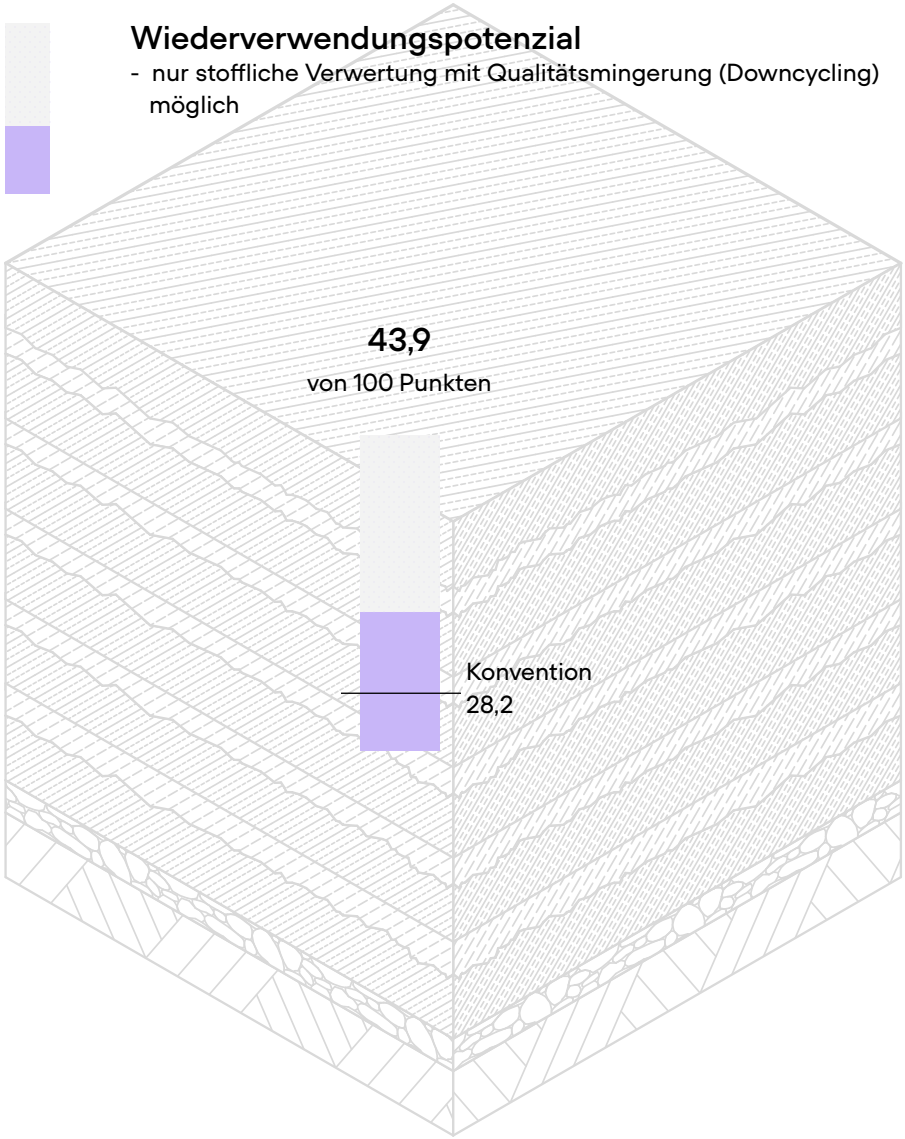
Demontagefähigkeit
- Demontage mit sehr hohem Aufwand verbunden

25,0

Werkstoffliche Trennbarkeit
+ Fundament ist nur eingeschrenkt trennbar

40,0

Wiederverwendungspotenzial
- nur stoffliche Verwertung mit Qualitätsmingerung (Downcycling) möglich



Prototypingische Entwicklung
Re-Use-Fundamente

↑ Gestapelte Betonelemente
←↓ Fügung zu Stapelfundamenten

Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

Fügung auf der Baustelle
Re-Use-Fundamente

↑ Zuschnitt Bestandsbodenplatte
← Versetzen der Betonelemente mit Kleinbagger
↓ Gefügte Betonelemente

Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

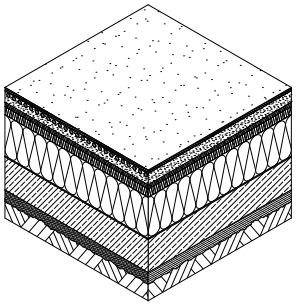
Fügung auf der Baustelle
Re-Use-Fundamente

↑ Fügung zu Stapelfundamenten
← Stapelfundamente

Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

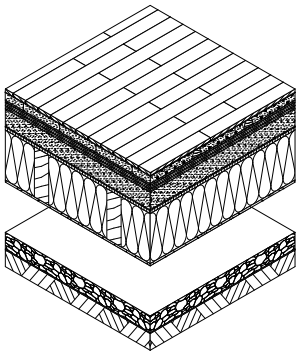
Konstruktiver Vergleich
Holz-Bodenplatte

*
Die Optimierungsschritte konnten im Projekt noch nicht umgesetzt werden, da Zuschnitt, Kategorisierung und Einbau gestufter wiederverwendeter Betonelemente einen hohen logistischen und baulichen Zusatzaufwand erfordern.



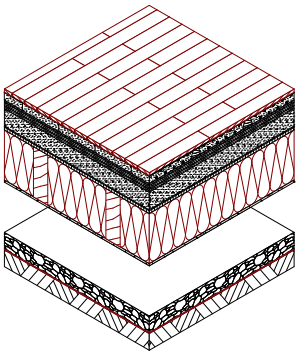
Konvention

PVC Belag	2 mm
Estrich (inkl. FBH)	70 mm
PE Folie	-
Mineralwolle	25 mm
EPS	50 mm
EPS Dämmung	250 mm
Bitumen Membran	-
Stahlbeton	200 mm
Sauberkeitsschicht	70 mm
Erdreich	



HLH

Dielenboden Eiche	19 mm
Lehmformplatte (inkl. FBH)	45 mm
Holzfaserplatte	12 mm
Holzfaserdämmplatte	2 x 20 mm
Holz-Lehmschüttung	104 mm
Dampfsperre (sd=1500)	-
Holzwerkstoffplatte	22 mm
Zellulose-Einblasdämmung/	300 mm
BSH (e= 500mm)	300/100 mm
Zementbauplatte	12 mm
RC-Gesteinskörnung	100 mm
PE Folie	-
Erdreich	



Vision

Wiederverwendete Holzdielen	19 mm
Lehmformplatte (inkl. FBH)	45 mm
Holzfaserplatte	12 mm
Holzfaserdämmplatte	2 x 20 mm
Holz-Lehmschüttung	104 mm
Ökologische Dampfbremse (sd=20)	-
Holzwerkstoffplatte	22 mm
Reedcrete (Paludi Dämmung)/	300 mm
Wiederverwendetes BSH (e= 500mm)	300/100 mm
Zementbauplatte	12 mm
RC-Gesteinskörnung	100 mm
Ökologische Dichtungsfolie	-
Erdreich	

Vergleichende Lebenszyklusanalyse
Holz-Bodenplatte

Konvention

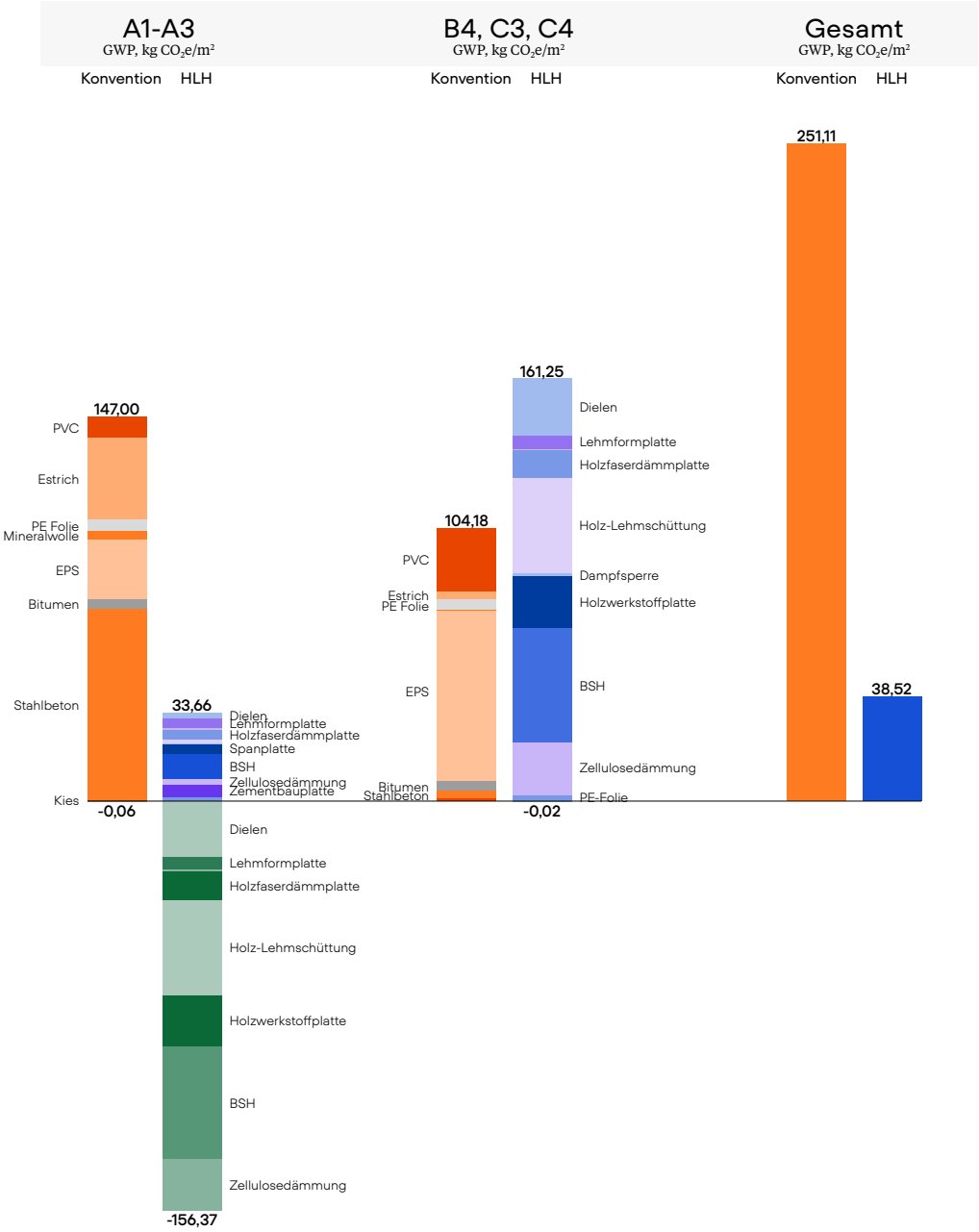
Treibhausgasemissionen, fossil GWP-fossil, kg CO_2e/m^2	Treibhausgasemissionen, gesamt GWP-total, kg CO_2e/m^2
251,17	**251,11**

Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,06

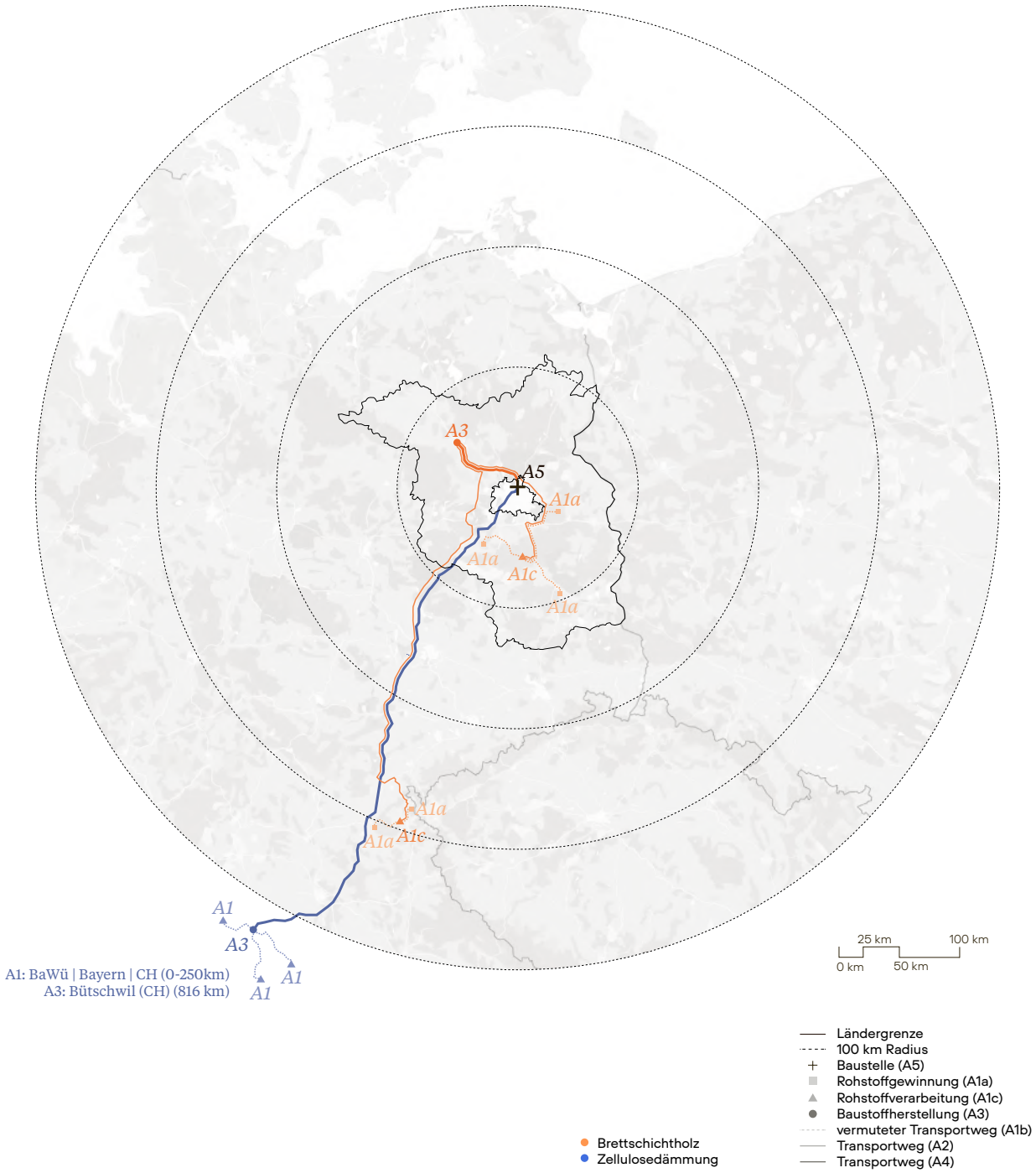
HLH

Treibhausgasemissionen, fossil GWP-fossil, kg CO_2e/m^2	Treibhausgasemissionen, gesamt GWP-total, kg CO_2e/m^2
194,91	**38,52**

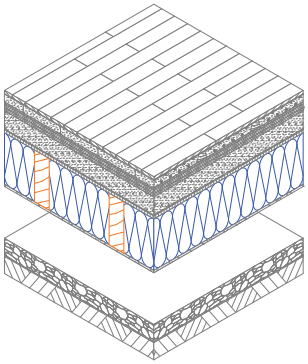
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-156,38



Regionalität
Holz-Bodenplatte



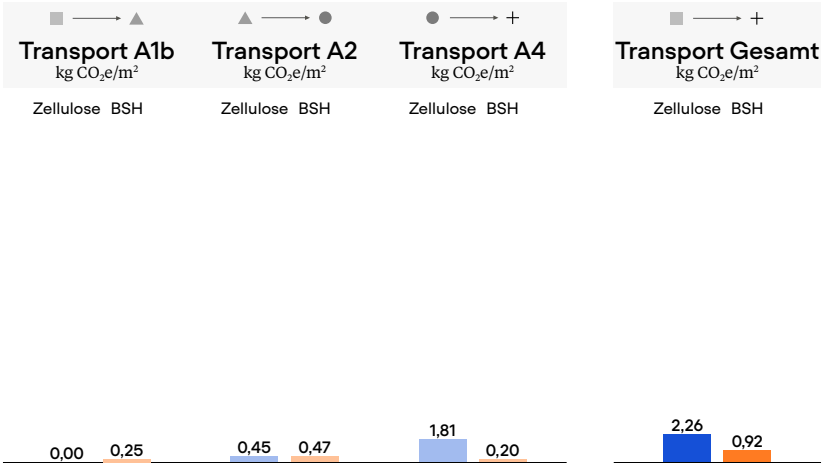
Transportemissionen
Holz-Bodenplatte



Bodenplatte
3,18 kg CO_2e/m^2

Zellulosedämmung
2,26 kg CO_2e/m^2 bei 1017 km

Brettschichtholz*
0,92 kg CO_2e/m^2 bei 312 km



Zirkularitätsbewertung
Holz-Bodenplatte

59,2

Materialherkunft
+ 31 % erneuerbare Primärrohstoffe
- Lehm als nicht erneuerbarer Primärrohstoff mit 0 gewertet
- hoher Volumenanteil (37%) an Zellulosedämmung (Open-Loop-Recycling)

74,0

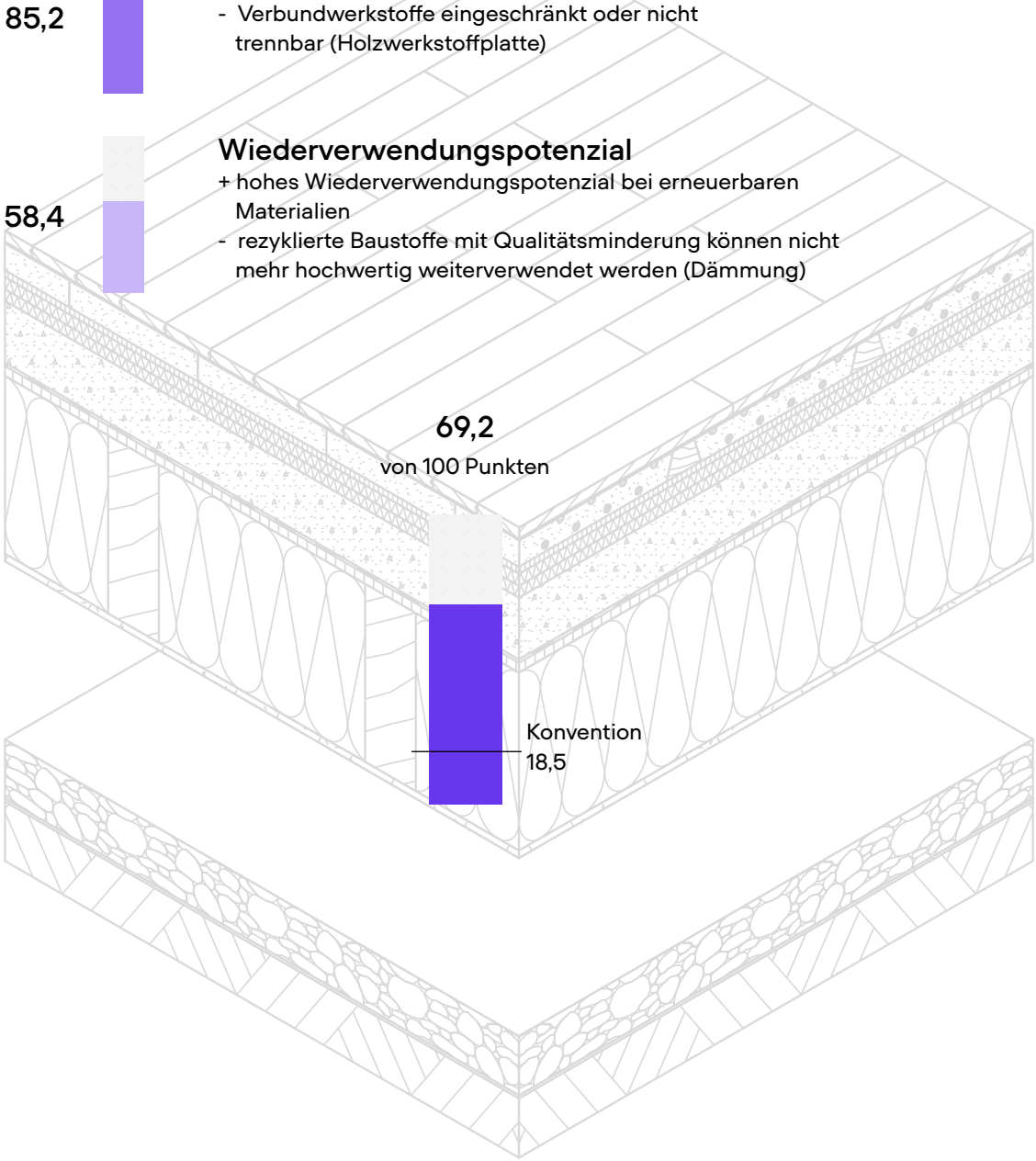
Demontagefähigkeit
+ wenig Verbundwerkstoffe
+ Massivholz mit einfachem Werkzeug demontierbar
- Demontage geklebter (Dampfsperre) oder mineralisch gebundener Baustoffe (Zementbauplatte) eingeschränkt oder nicht möglich

85,2

Werkstoffliche Trennbarkeit
+ naturbasierte Materialien sortenrein trennbar
- Verbundwerkstoffe eingeschränkt oder nicht trennbar (Holzwerkstoffplatte)

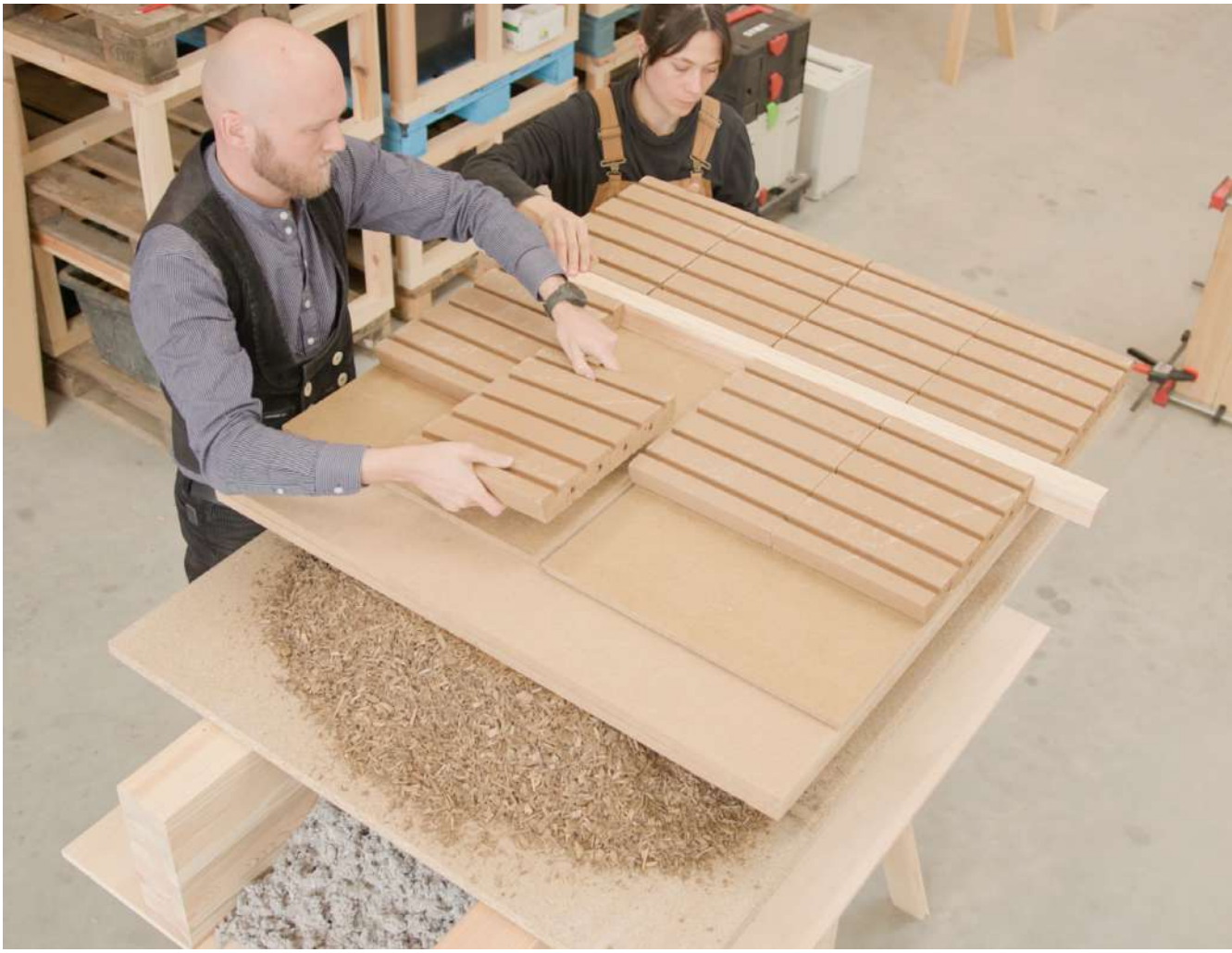
58,4

Wiederverwendungspotenzial
+ hohes Wiederverwendungspotenzial bei erneuerbaren Materialien
- rezyklierte Baustoffe mit Qualitätsminderung können nicht mehr hochwertig weiterverwendet werden (Dämmung)



Demonstrator
Holz-Bodenplatte

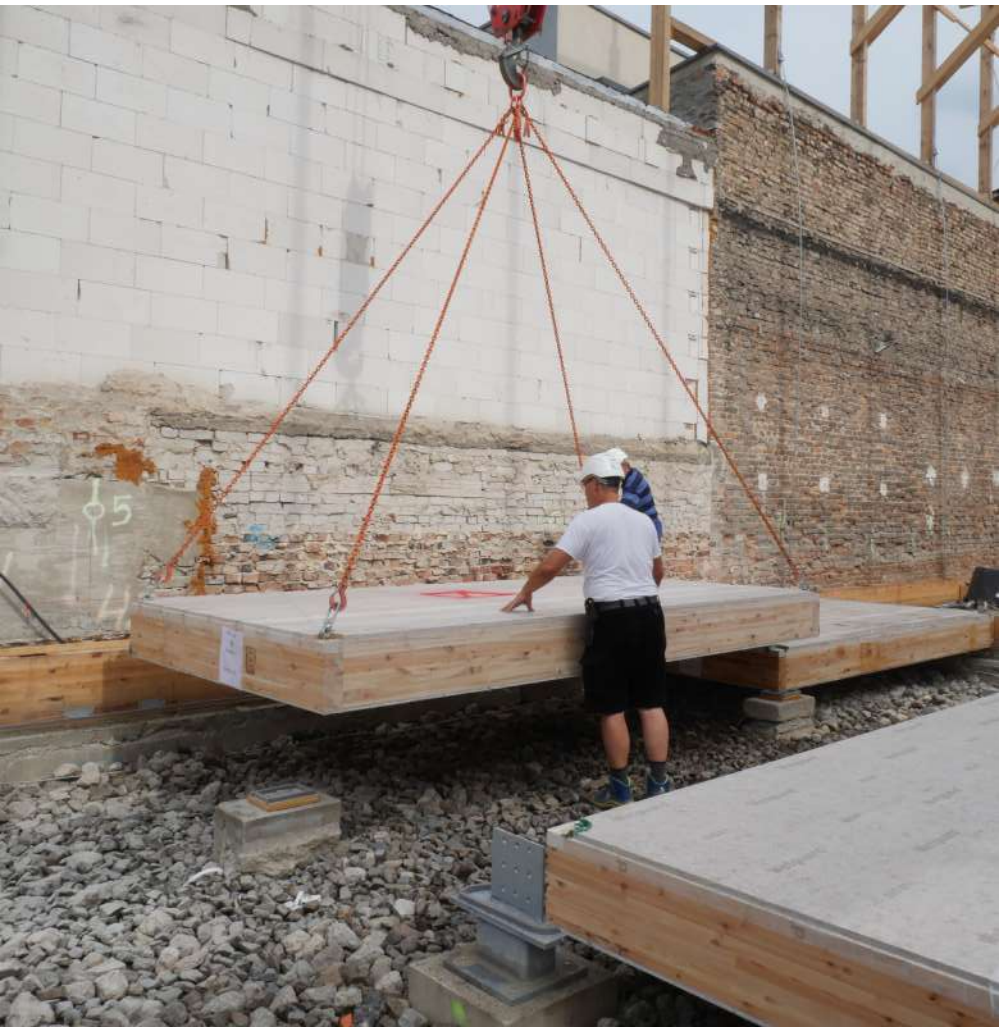
←↓ Demonstratorherstellung Bodenplatte
Fotos: Fabian Wolf



Fügung auf der Baustelle
Holz-Bodenplatte

←↓ Einheben und Positionieren der vorgefertigten Bodenplattenelemente
Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

Fügung auf der Baustelle
Holz-Bodenplatte

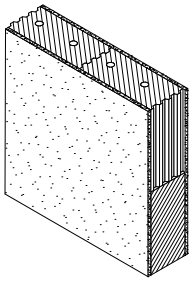


← Einheben und Positionieren der vorgefertigten Bodenplattenelemente
↓ Bodenplatte auf Fundament

Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

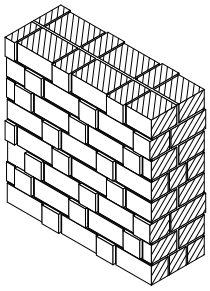
Konstruktiver Vergleich
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

*
Schlankere Mauerwerksquerschnitte konnten im Projekt noch nicht umgesetzt werden, da die dafür erforderlichen Druckfestigkeiten der Lehmsteine sowie optimierte Mörtelkennwerte derzeit noch nicht verfügbar sind.



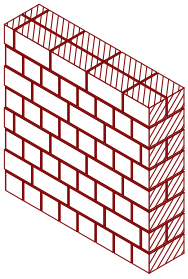
Konvention

Gipsputz	15 mm
Kalkstein MW	240 mm
Gipsputz	15 mm



HLH

Lehmstein (2DF und 3DF)/ Lehmmauermörtel	365 mm



Vision*

Lehmstein (2DF) mit erhöhter Druckfestigkeit/ Lehmmauermörtel mit erhöhter Haftscherfestigkeit	240 mm

Vergleichende Lebenszyklusanalyse
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

Konvention

Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
82,40

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
82,36

Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,04

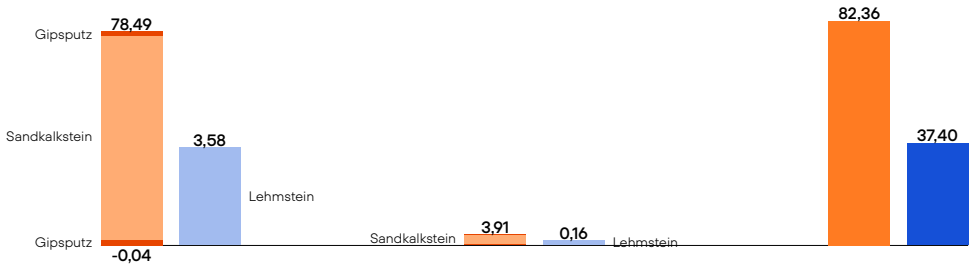
HLH

Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
37,40

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
37,40

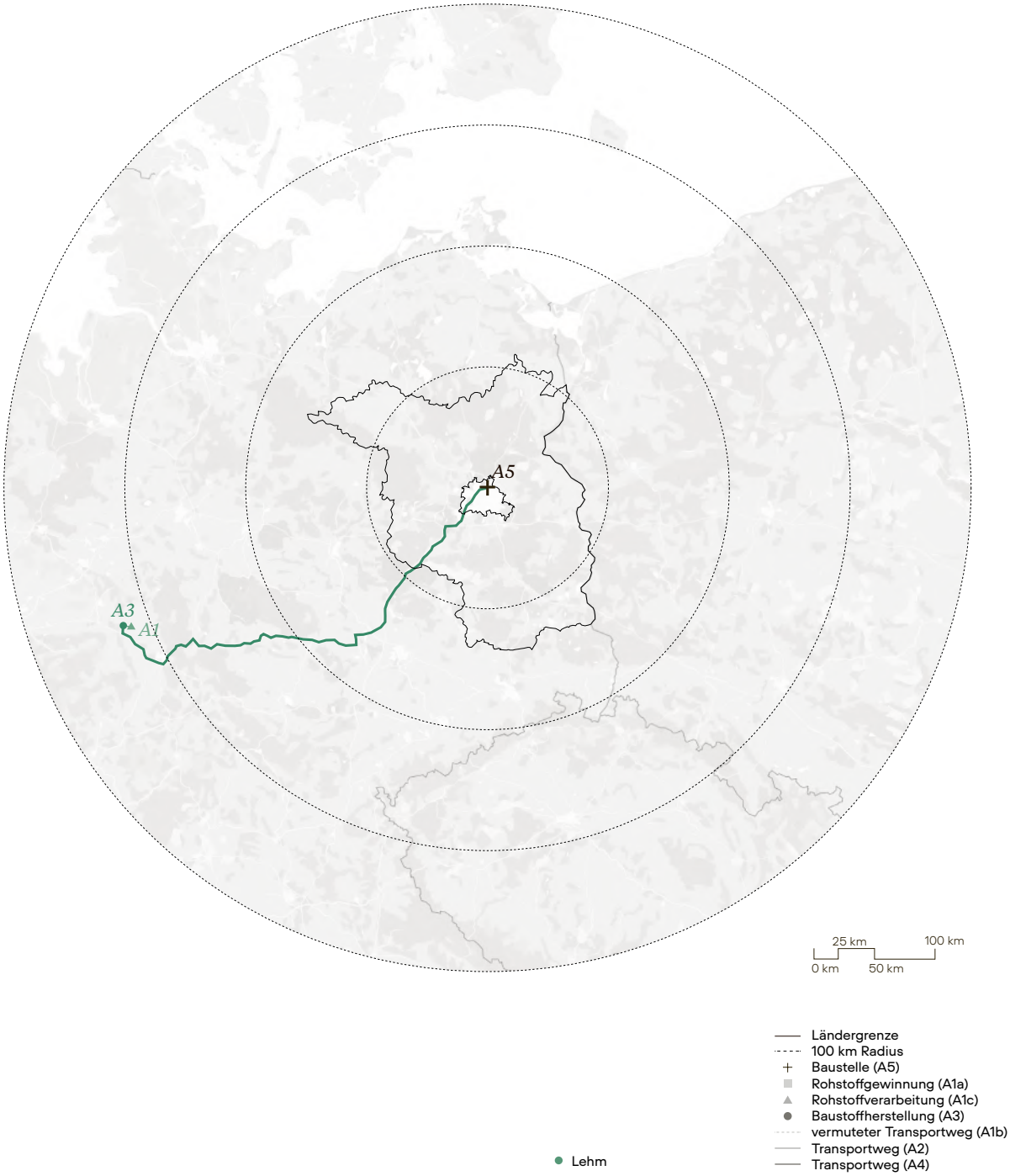
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
0,00

A1-A3 GWP, kg CO_2e/m^2		B4, C3, C4 GWP, kg CO_2e/m^2		Gesamt GWP, kg CO_2e/m^2	
Konvention	HLH	Konvention	HLH	Konvention	HLH



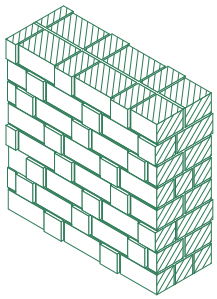
Regionalität

Tragendes Lehmsteinmauerwerk



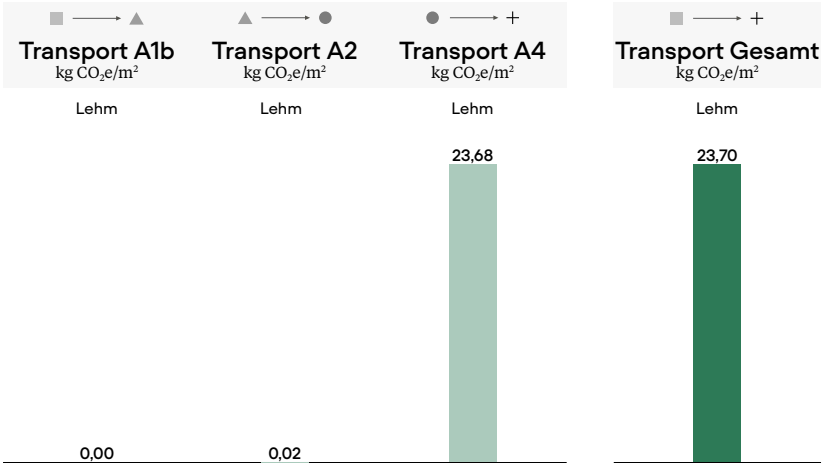
Transportemissionen

Tragendes Lehmsteinmauerwerk



Tragende Innenwand
23,70 kg CO_2e/m^2

Lehm
23,70 kg CO_2e/m^2 bei 449 km



Zirkularitätsbewertung
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

0,0

Materialherkunft
- Lehm wird als nicht erneuerbarer Primärrohstoff mit 0 Punkten bewertet, jedoch ist seine Verfügbarkeit nicht limitiert und seine ökologische Belastung als gering zu betrachten

75,0

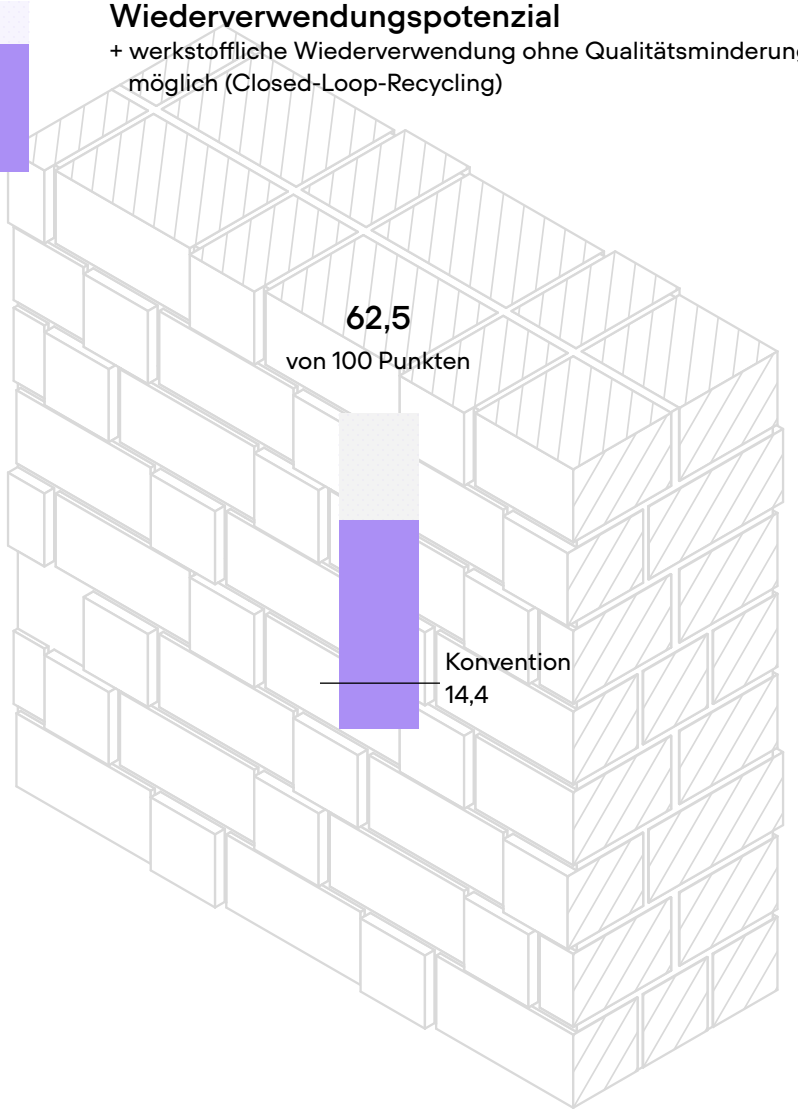
Demontagefähigkeit
+ Demontage mit einfachem Werkzeug möglich

100,00

Werkstoffliche Trennbarkeit
+ Lehm ist sortenrein trennbar

75,0

Wiederverwendungspotenzial
+ werkstoffliche Wiederverwendung ohne Qualitätsminderung möglich (Closed-Loop-Recycling)



Prototypingische Entwicklung
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

↑ Herstellung Prototyping 1
Foto: Bauhaus Erde

↑ Prototyping 1
← Prototyping 2
↓ Prototyping 3, finale Version

Fotos: Bauhaus Erde

Fügung auf der Baustelle
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

← Einheben des vorgefertigten Lehmsteinmauerwerks
↓ Offen verzahnte Stöße der vorgefertigten Lehmsteinmauerwerkselemente

Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

Fügung auf der Baustelle
Tragendes Lehmsteinmauerwerk

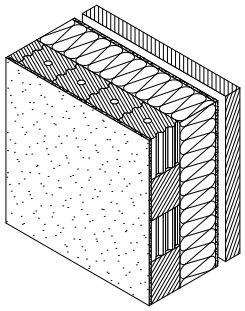
← Offen verzahnte Stöße der vorgefertigten Lehmsteinmauerwerkselemente
Foto: Jan Bitter

↓ Einheben und Positionieren der vorgefertigten Lehmsteinmauerwerkselemente
Foto: B&O Bau und Gebäudetechnik

Konstruktiver Vergleich
Holz-Gebäudeabschlusswand

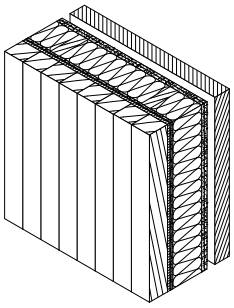
*

Mehrere weiterführende Optimierungsschritte konnten im Projekt noch nicht umgesetzt werden, da brandschutztechnisch geeignete ökologische Materialalternativen nur eingeschränkt verfügbar sind, wiederverwendete Konstruktionshölzer lokal kaum vorliegen und entsprechende Zulassungen fehlen.



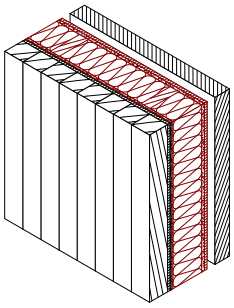
Konvention

Gipsputz	15 mm
Kalkstein	240 mm
WDVS (Mineralwolle)	250 mm
Nachbarbebauung	



HLH

Kieferstiele	125 mm
Holzwerkstoffplatte	22 mm
Dampfbremse (sd=10)	-
Gipsfaserplatte	12,5 mm
Zellulose-Einblasdämmung/	200 mm
KVH (e= 625mm)	60/200 mm
Gipsfaserplatte	2x 18 mm
Nachbarbebauung	



Vision *

Kieferstiele	125 mm
Holzwerkstoffplatte	22 mm
Ökologische Dampfbremse (sd=6,45)	-
Lehmbauplatte schwer (F90)	22 mm
Reedcrete (Paludi Dämmung)/	200 mm
ReUse KVH (e= 625mm)	60/200 mm
Lehmbauplatte schwer (F90)	22 mm
Karbonisiertes Massivholz	20 mm
Nachbarbebauung	

Vergleichende Lebenszyklusanalyse
Holz-Gebäudeabschlusswand

Konvention

Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
118,03

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
117,79

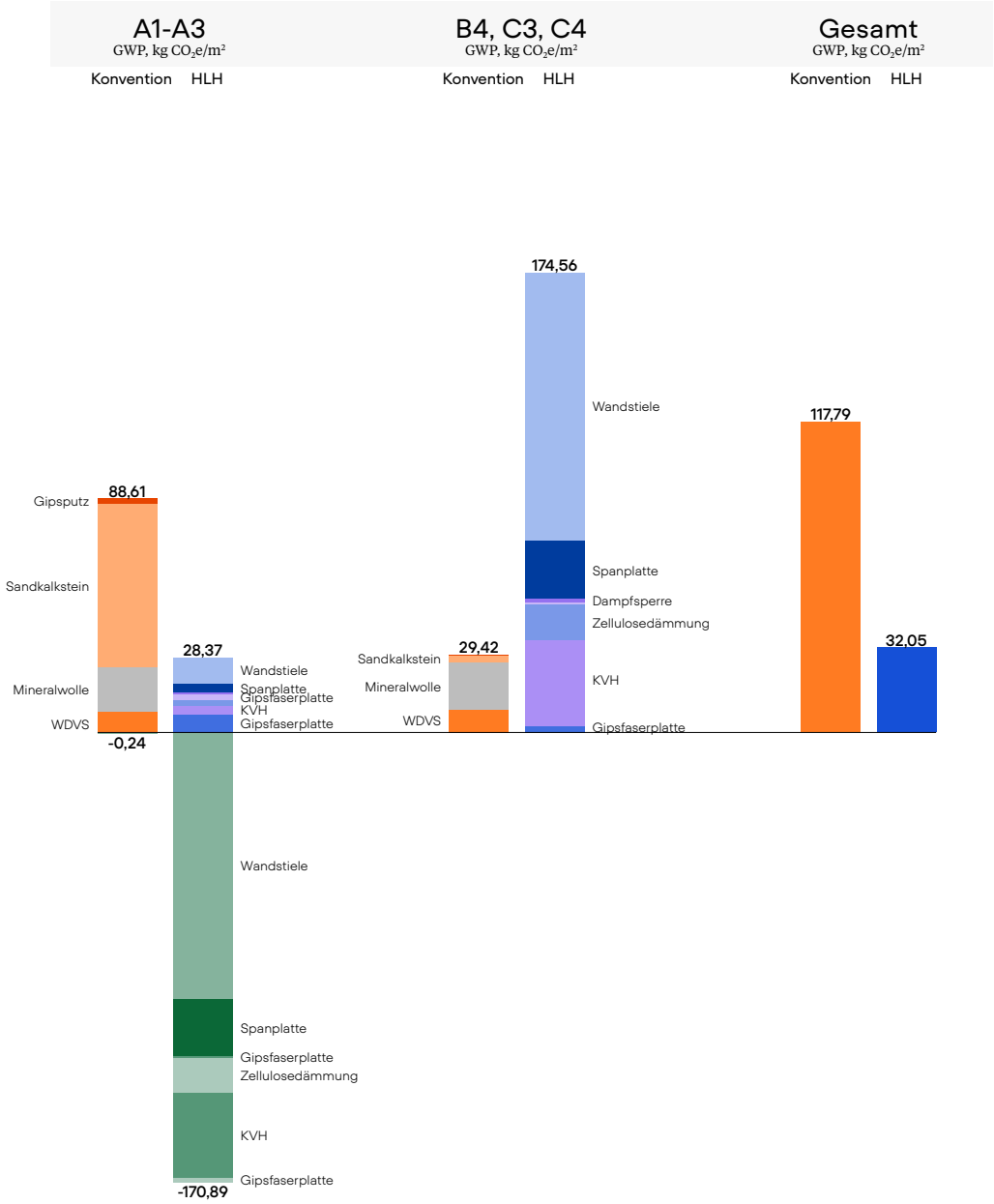
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,24

HLH

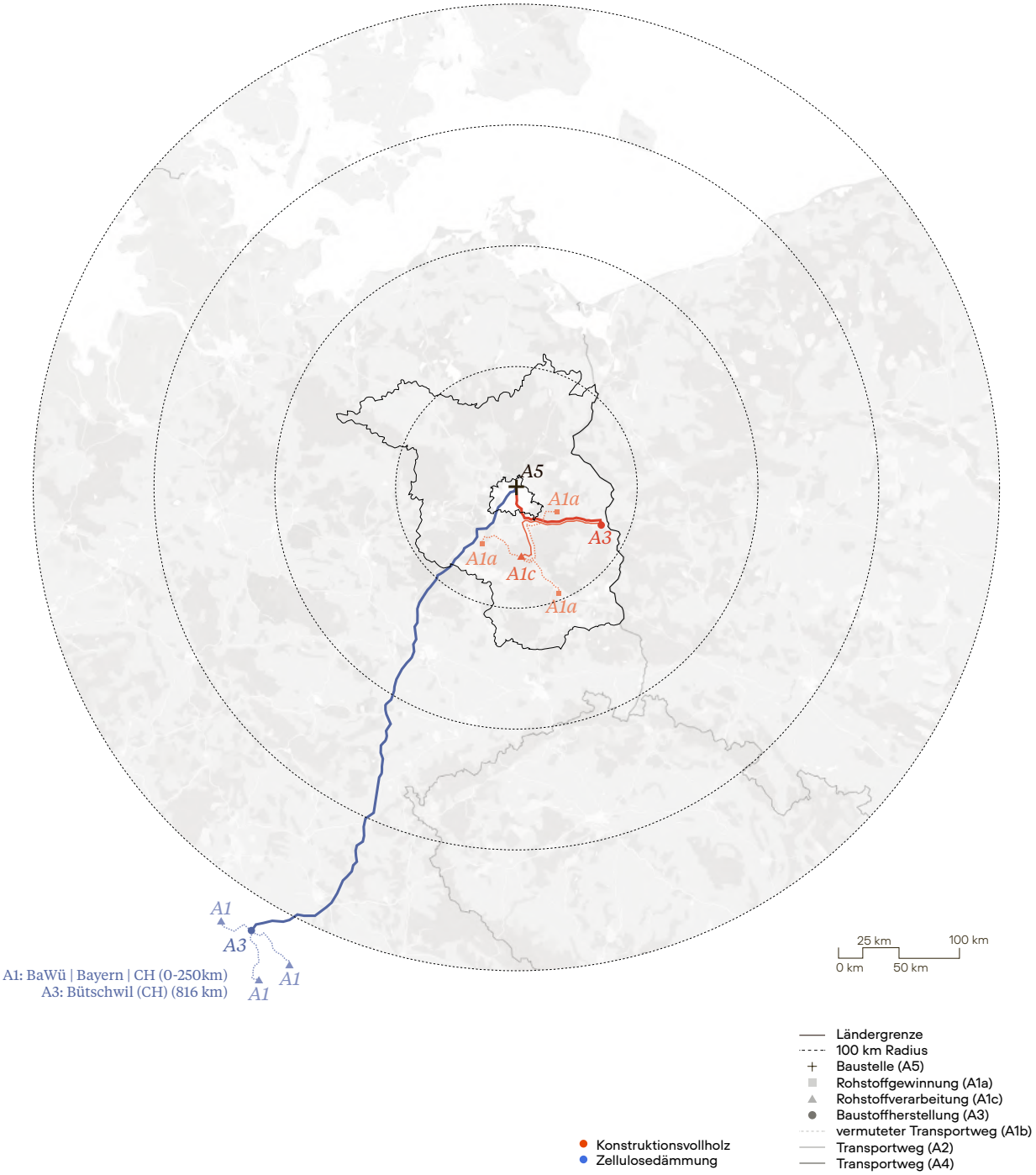
Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
202,94

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
32,05

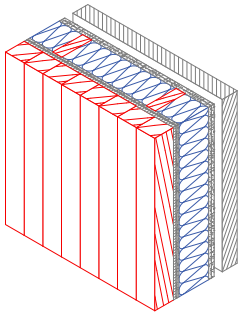
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-170,89



Regionalität
Holz-Gebäudeabschlusswand



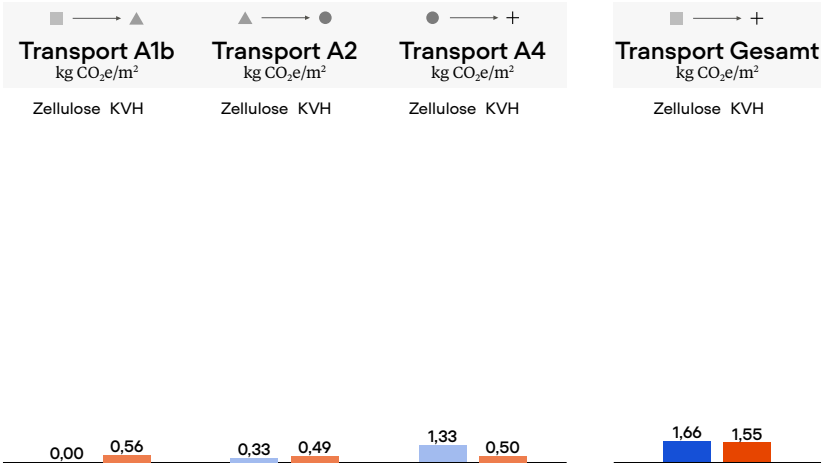
Transportemissionen
Holz-Gebäudeabschlusswand



Gebäudeabschlusswand
3,21 kg CO_2e/m^2

Zellulosedämmung
1,66 kg CO_2e/m^2 bei 1017 km

Konstruktionsvollholz
1,55 kg CO_2e/m^2 bei 275 km



Zirkularitätsbewertung
Holz-Gebäudeabschlusswand

55,7

Materialherkunft
+ 48 % erneuerbare Primärrohstoffe
- hoher Volumenanteil (37%) an Zellulosedämmung (Open-Loop-Recycling)

58,7

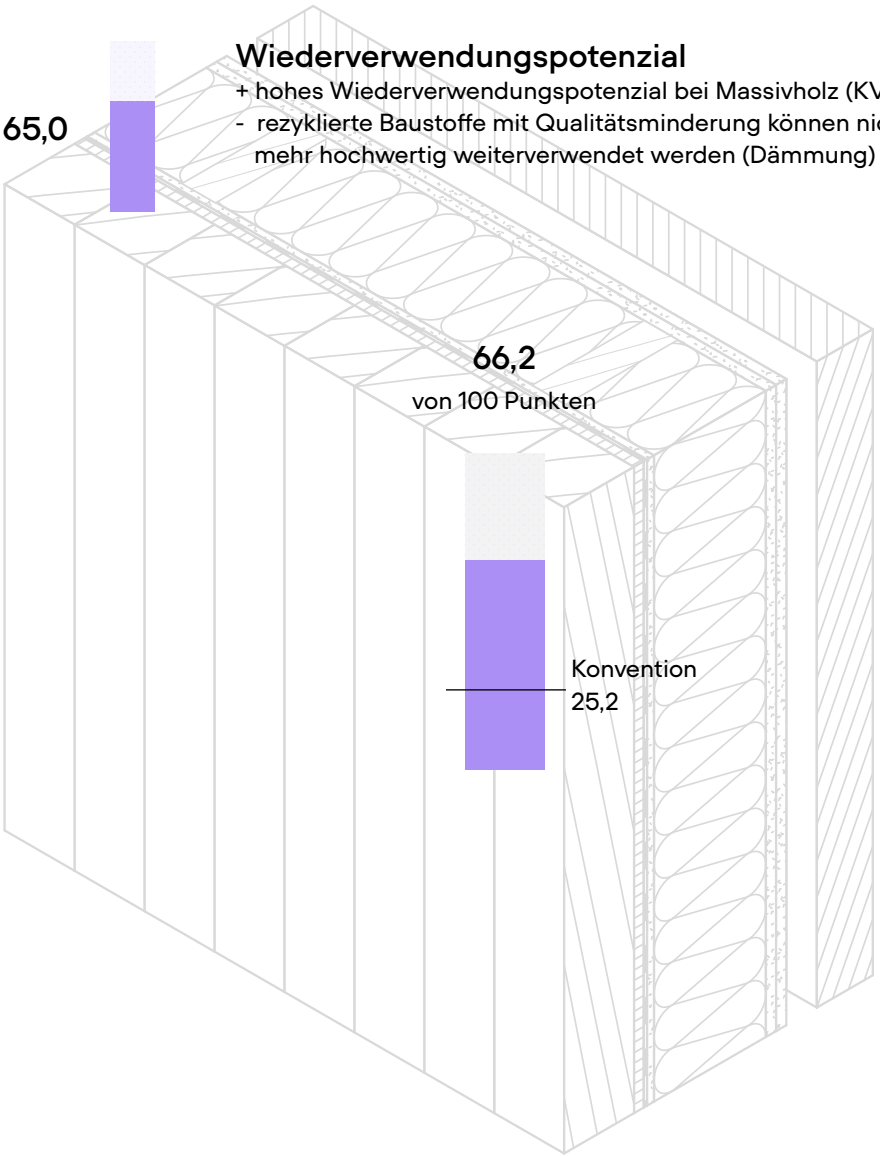
Demontagefähigkeit
+ wenig Verbundwerkstoffe
+ Massivholz mit einfachem Werkzeug demontierbar
- Demontage geklebter (Dampfsperre) oder mineralisch gebundener Baustoffe (Gipsfaserplatte) eingeschränkt oder nicht möglich

85,2

Werkstoffliche Trennbarkeit
+ naturbasierte Materialien sortenrein trennbar
- Verbundwerkstoffe eingeschränkt oder nicht trennbar (Holzwerkstoffplatte)

65,0

Wiederverwendungspotenzial
+ hohes Wiederverwendungspotenzial bei Massivholz (KVH)
- rezyklierte Baustoffe mit Qualitätsminderung können nicht mehr hochwertig weiterverwendet werden (Dämmung)



Demonstrator
Holz-Gebäudeabschlusswand

←↑↓ Demonstratorherstellung Gebäudeabschlusswand
Fotos: Fabian Wolf

Fügung auf der Baustelle
Holz-Gebäudeabschlusswand

← Setzen des vorgefertigten Wandelements auf Rähm
↑ Metallsteckverbinder auf Rähm
↓ Einheben und Positionieren des vorgefertigten Wandelements

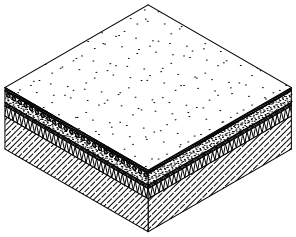
Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

Fügung auf der Baustelle
Holz-Gebäudeabschlusswand

↑ Sichtbares Kiefernholz im Innenbereich
Foto: B&O Bau und Gebäudetechnik

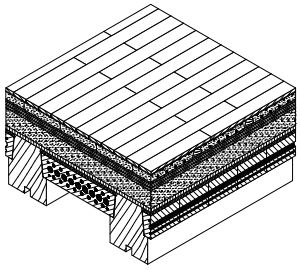
Konstruktiver Vergleich
Holz-Lehm-Hybriddecke

*
Mehrere weiterführende Optimierungsschritte konnten im Projekt noch nicht umgesetzt werden, da wiederverwendete Balkenquerschnitte in geeigneter Qualität derzeit kaum verfügbar sind und für weiter gespannte Lehmtragwerke noch die entsprechenden bautechnischen Nachweise fehlen.



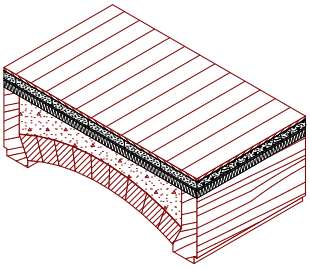
Konvention

PVC Belag	2 mm
Estrich (inkl. FBH)	70 mm
PE Folie	-
Mineralwolle	25 mm
EPS	50 mm
EPS Dämmung	250 mm
Stahlbeton	200 mm



HLH

Holzdielen	19 mm
Lehmformplatte (inkl. FBH), Keilleisten	45 mm
Holzfaserdämmplatte (weich)	12 mm
Holzfaserdämmplatte	2 x 20 mm
Holz-Lehmschüttung	104 mm
Holzwerkstoffplatte	22 mm
Schafwolle	20 mm
Lehmformstein/ Balken BSH (e= 700mm)	500/200/140 mm 260/320 mm



Vision*

Wiederverwendete Holzdielen	19 mm
Lehmformplatte (inkl. FBH), Keilleisten	45 mm
Holzfaserdämmplatte (weich)	12 mm
Holzfaserdämmplatte	2 x 20 mm
Holz-Lehmschüttung	103- 231 mm
Lehmformstein/ Re-Use Balken BSH (e= 1330 mm)	240/113/115 mm 330/400 mm

Vergleichende Lebenszyklusanalyse
Holz-Lehm-Hybriddecke

Konvention

Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
169,50

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
169,50

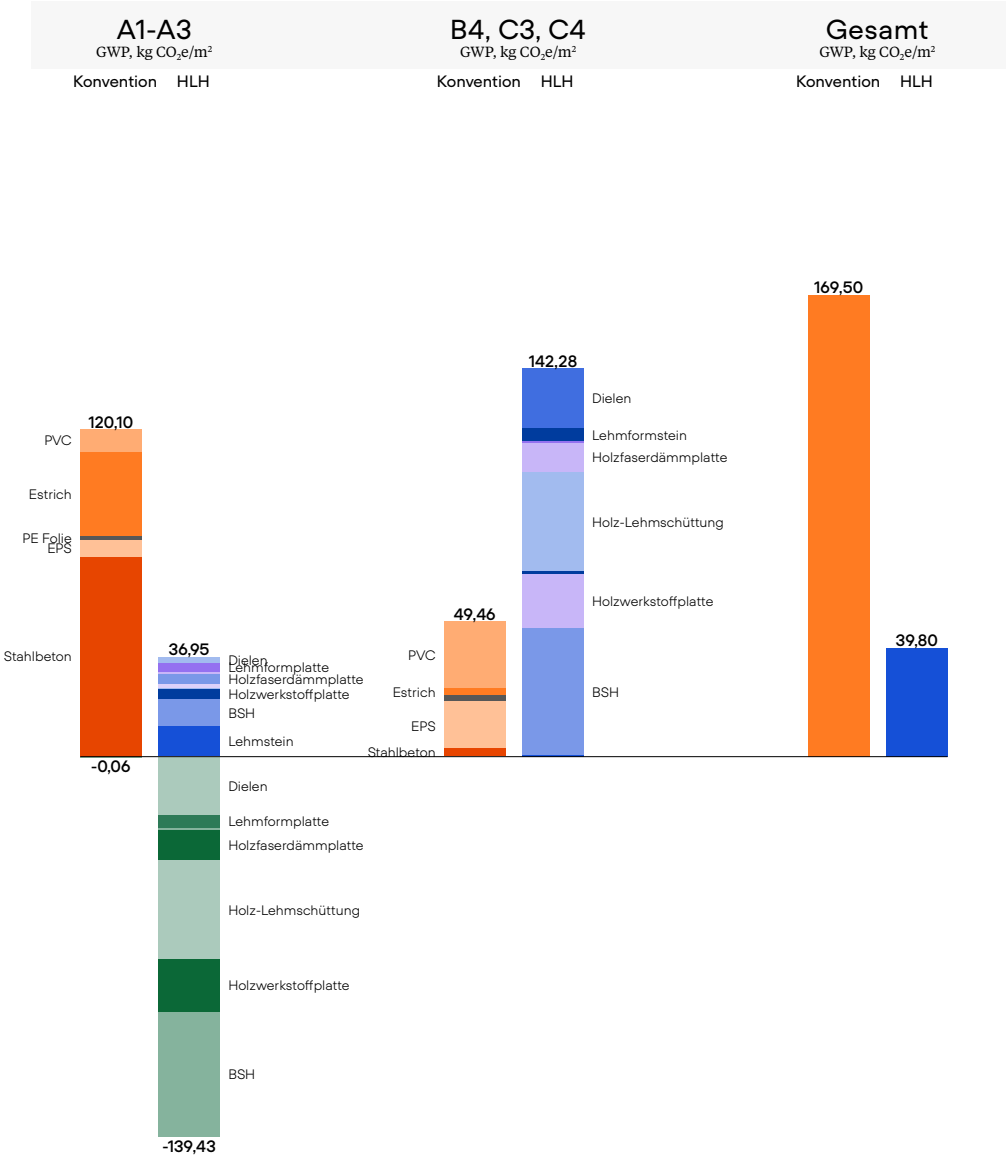
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-0,06

HLH

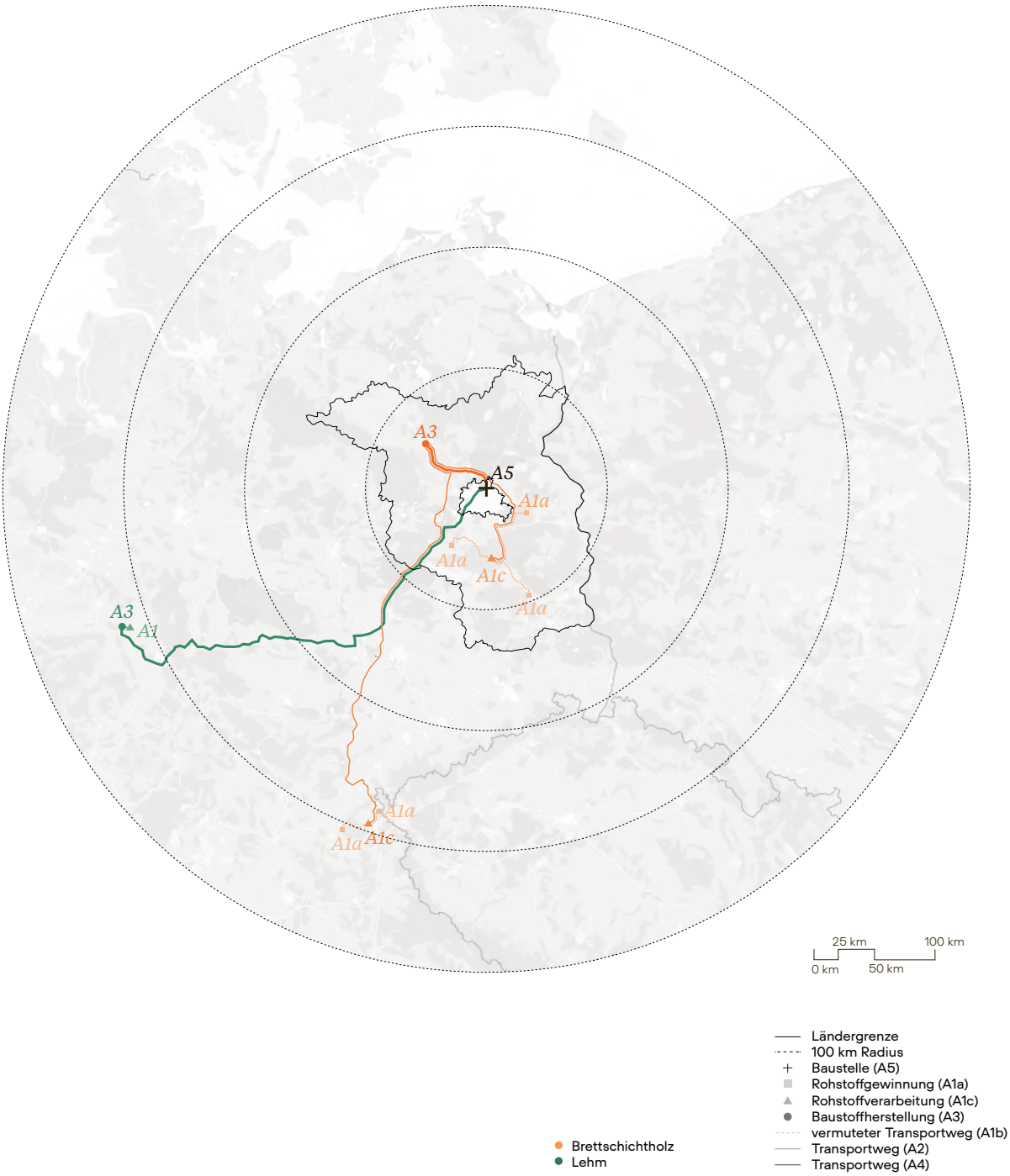
Treibhausgasemissionen, fossil
GWP-fossil, kg CO_2e/m^2
179,22

Treibhausgasemissionen, gesamt
GWP-total, kg CO_2e/m^2
39,80

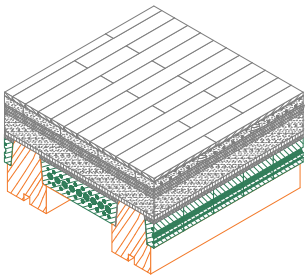
Kohlenstoffspeicherfähigkeit
GWP-biogenic, kg CO_2e/m^2
-139,43



Regionalität
Holz-Lehm-Hybriddecke



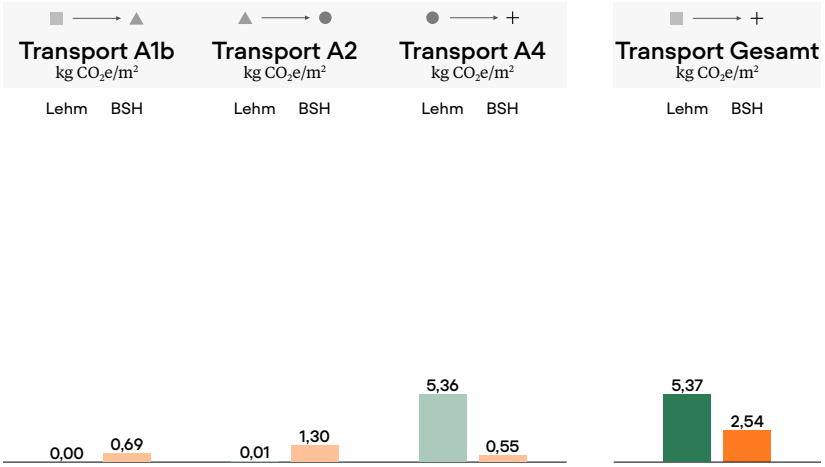
Transportemissionen
Holz-Lehm-Hybriddecke



Geschossdecke
7,91 kg CO_2e/m^2

Lehmformstein
5,37 kg CO_2e/m^2 bei 449 km

Brettschichtholz*
2,54 kg CO_2e/m^2 bei 312 km



Zirkularitätsbewertung
Holz-Lehm-Hybriddecke

44,0

Materialherkunft
- Lehm (41%) als nicht erneuerbarer Primärrohstoff mit 0 gewertet
- keine wiederverwendeten oder weiterverwendeten Materialien

75,6

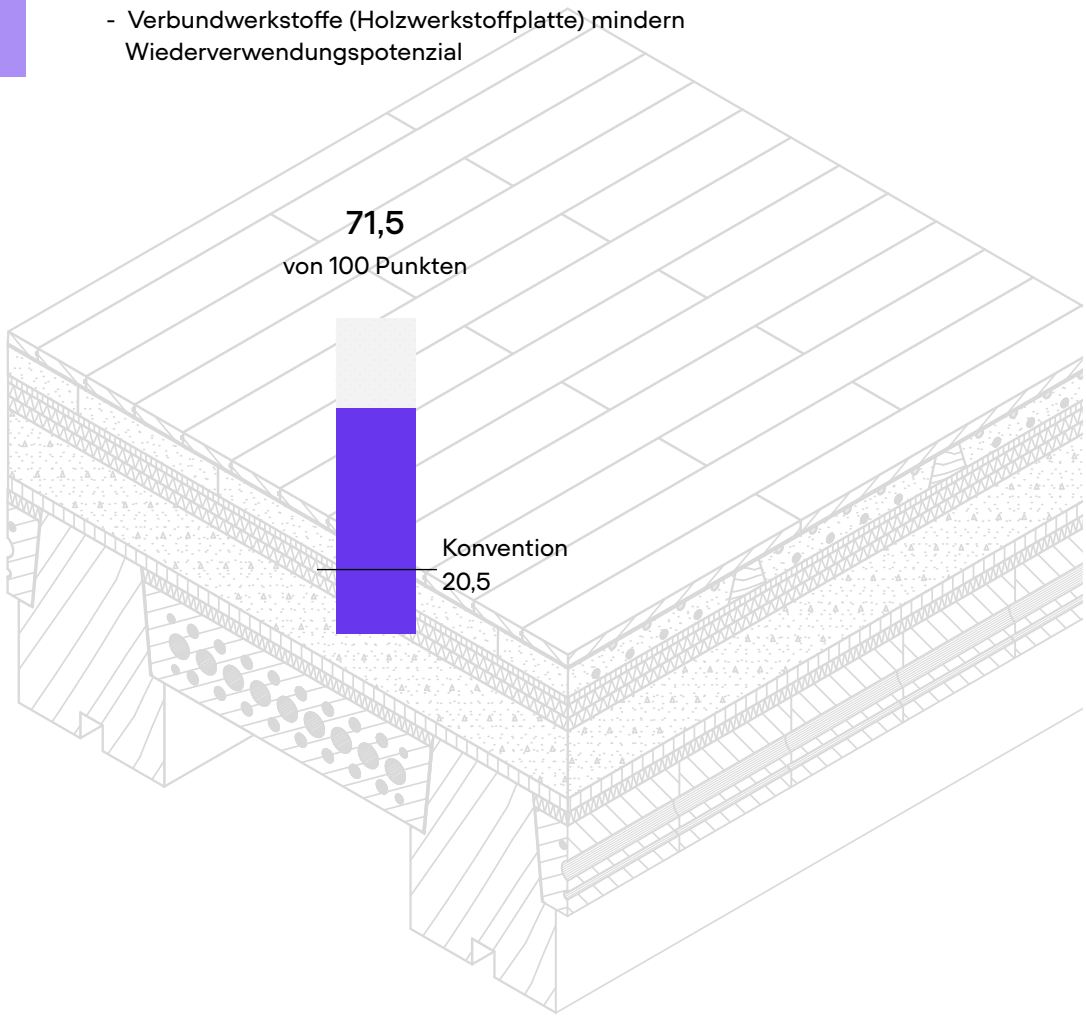
Demontagefähigkeit
+ wenig Verbundwerkstoffe
+ Massivholz mit einfachem Werkzeug demontierbar

84,5

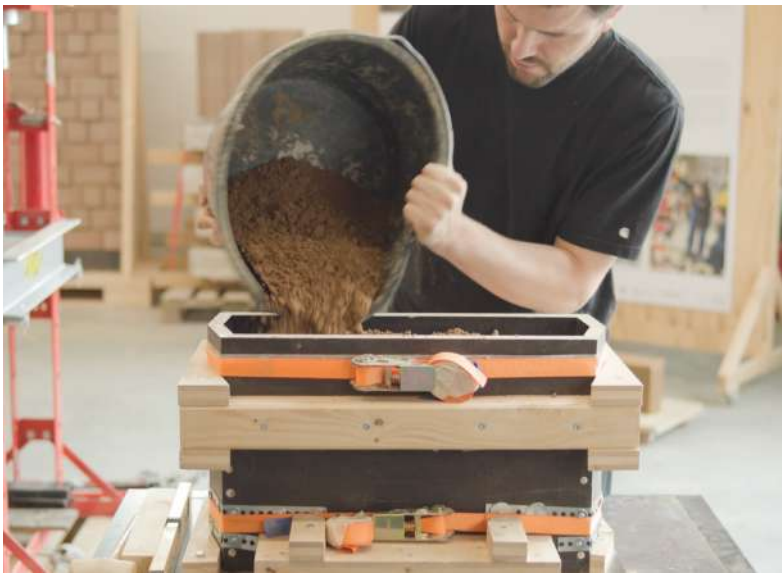
Werkstoffliche Trennbarkeit
+ naturbasierte Materialien sortenrein trennbar
- Verbundwerkstoffe eingeschränkt oder nicht trennbar (Holzwerkstoffplatte)

81,9

Wiederverwendungspotenzial
+ hohes Wiederverwendungspotenzial bei erneuerbaren Materialien
- Verbundwerkstoffe (Holzwerkstoffplatte) mindern Wiederverwendungspotenzial



Prototypingische Entwicklung
Holz-Lehm-Hybriddecke



↑ Herstellung Prototyping Lehmdeckenstein
Foto: Fabian Wolf

← Prototyping gepresster Lehmdeckenstein
↓ Prototyping Holz-Lehm-Hybriddecke
Fotos: Bauhaus Erde

Industrielle Fertigung
Holz-Lehm-Hybriddecke

↑ Industriell gefertigter Lehmeinhangstein,
Ziegelei August Lücking
Foto: Fabian Wolf

Fügung auf der Baustelle
Holz-Lehm-Hybriddecke

← Anlieferung Lehmeinhangsteine auf die Baustelle
↓ Holz-Lehm-Hybriddecke
Fotos: B&O Bau und Gebäudetechnik

Anhang B

Bauteilübergreifende Bewertung und Materialkreisläufe

Wertschöpfungsketten Massivholz | Lehmsteine | Re-Use-Beton

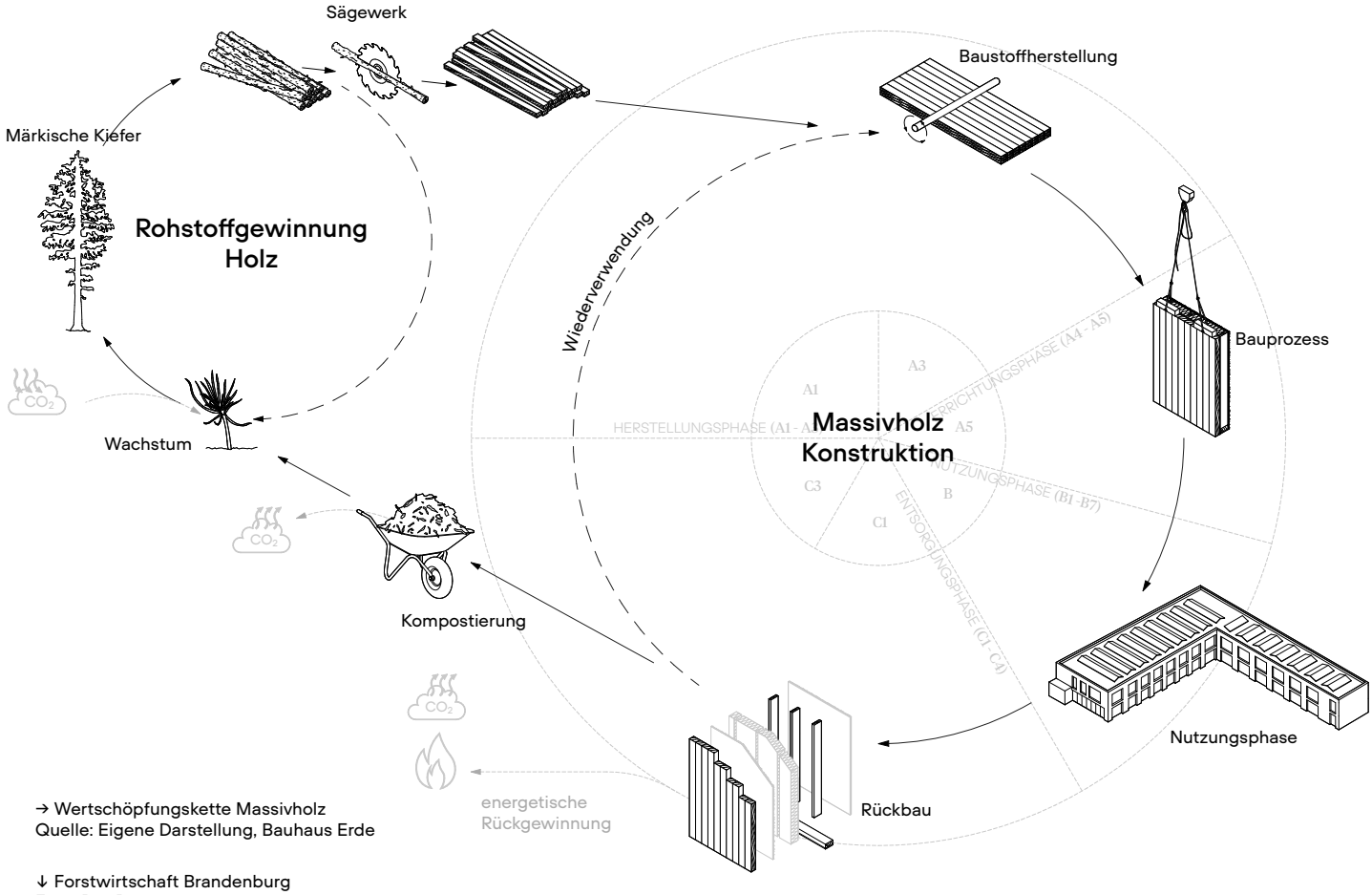
Lebenszyklusanalyse

Transportbedingte Emissionen

Zirkularitätsbewertung

Bauteilfügungen

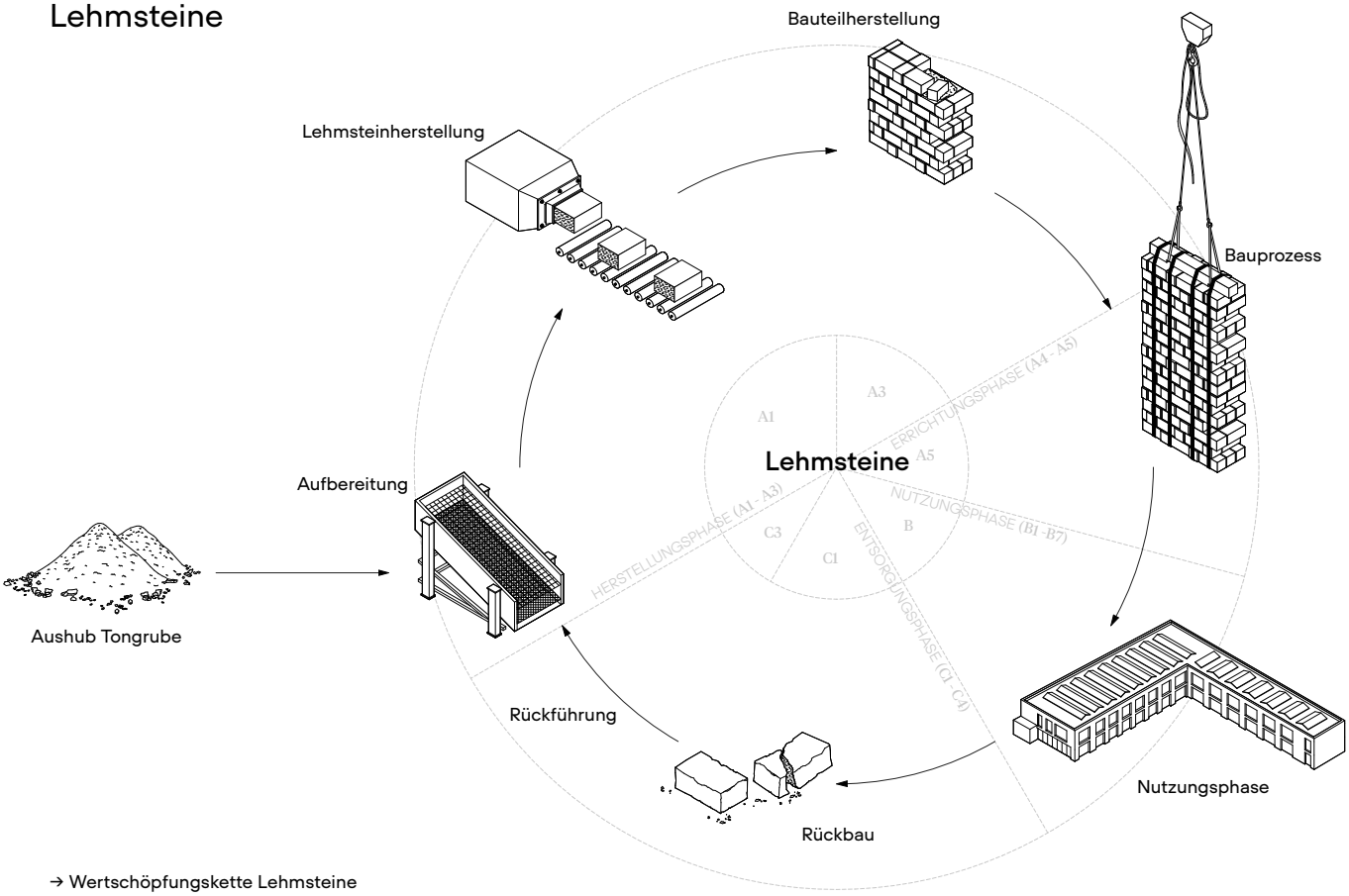
Wertschöpfungskette
Massivholz



→ Wertschöpfungskette Massivholz
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

↓ Forstwirtschaft Brandenburg
Foto: Bas Princen

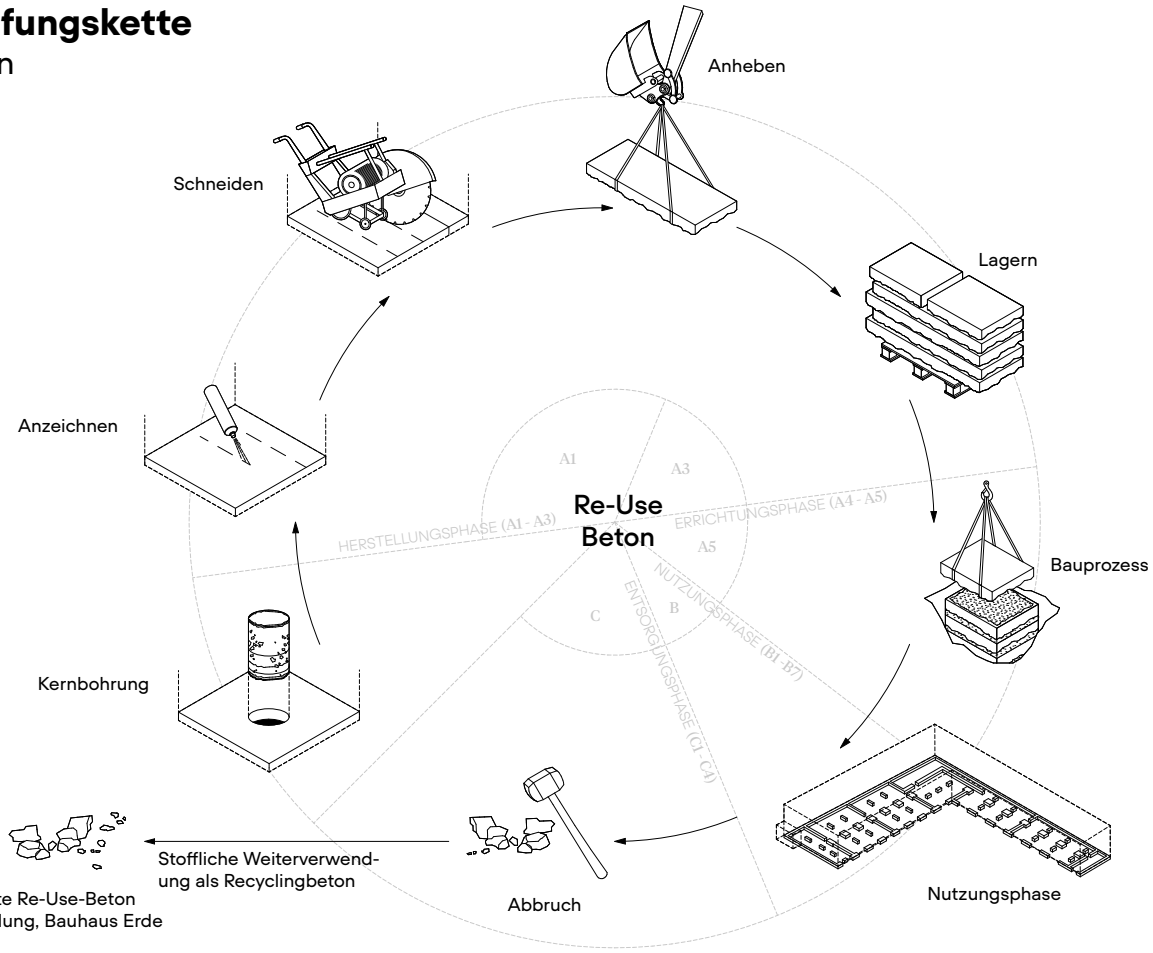
Wertschöpfungskette
Lehmsteine



→ Wertschöpfungskette Lehmsteine
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

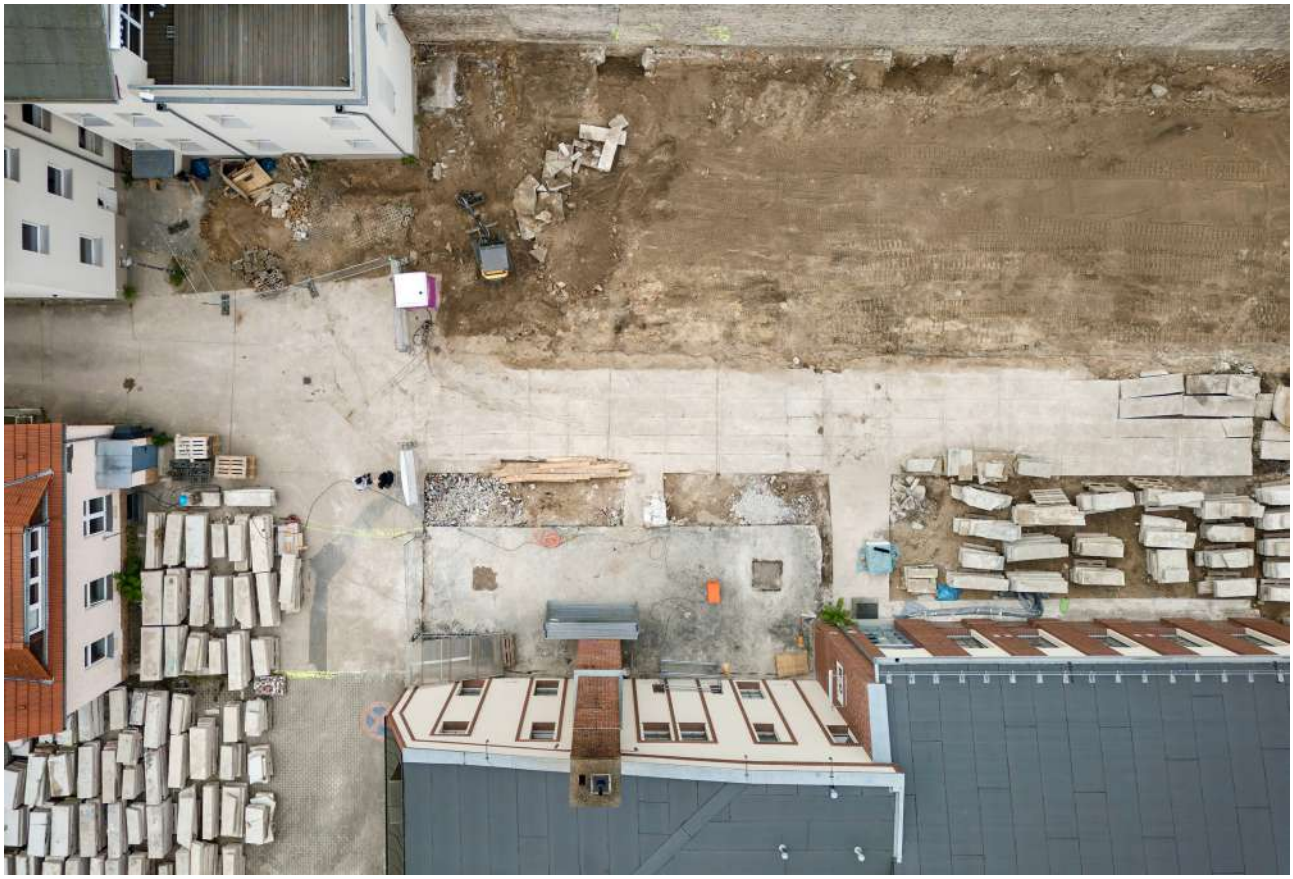
↓ Aushub Lehmgrube Ziegelei August Lücking
Foto: Fabian Wolf

Wertschöpfungskette
Re-Use-Beton



→ Wertschöpfungskette Re-Use-Beton
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

↓ Bestandsbodenplatte
Foto: Jan Bitter



Lebenszyklusanalyse
Bewertungstabelle

BAUTEIL	KONVETION/PROJEKT	SYSTEMAUFBAU	PRODUKTE	DICKE	FLÄCHE	GWP A1-A3	GWP Biogenic A1-A3	GWP B4,C3,C4	GWP Biogenic B4,C3,C4	GWP TOTAL
				in mm	in m2	kg CO2e	kg CO2e	kg CO2e	kg CO2e	kg CO2e
FUNDAMENT	KONVENTION			**1050,00**	**1,00**	**258,33**	**-0,39**	**15,55**	**0,00**	**273,50**
		unbewehrter Beton		1000,00	1,00	258,08	-0,38	14,90	0,00	272,59
		Sauberkeitsschicht Kies		50,00	1,00	0,26	0,00	0,66	0,00	0,91
	PROJEKT			**1050,00**	**0,80**	**44,73**	**-0,05**	**12,16**	**0,00**	**56,83**
		ReUse Beton	Bestandsbodenplatte	800,00	0,80	0,00	0,00	9,53	0,00	9,53
		RC Beton	Cemex, RC-Beton	200,00	0,80	44,73	-0,05	2,62	0,00	47,30
		RC Gesteinskörnung (ungeb.)	RC-1	50,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BODENPLATTE	KONVENTION			**689,13**	**1,00**	**146,99**	**-0,06**	**104,19**	**0,00**	**251,12**
		PVC Belag		20,00	1,00	8,24	-0,06	24,46	0,00	32,65
		Estrich		70,00	1,00	31,08	0,00	2,79	0,00	33,87
		PE Folie		0,13	1,00	4,47	0,00	4,14	0,00	8,61
		MiWo		25,00	1,00	3,25	0,00	0,10	0,00	3,35
		EPS blaugelb		300,00	1,00	23,02	0,00	65,20	0,00	88,22
		Bitumen Membran		4,00	1,00	3,33	0,00	3,69	0,00	7,02
		Stahlbeton		200,00	1,00	73,25	0,00	2,88	0,00	76,13
		Sauberkeitsschicht Kies		70,00	1,00	0,35	0,00	0,92	0,00	1,27
	PROJEKT			**607,80**	**1,00**	**33,66**	**-156,37**	**161,25**	**-0,02**	**38,52**
		Dielenboden	Eichendiele, schädlingsbefallen	19,00	1,00	1,91	-21,28	21,70	0,00	2,33
		Lehmformplatte (inkl.FBH)	Lethermo (inkl. FBH)	45,00	1,00	3,75	0,00	0,17	0,00	3,92
		Vollholzkeilleisten	Vollholzkeilleisten, Kiefer	45,00	1,00	0,48	-4,74	4,77	0,00	0,52
		Holzfaserdämmplatte, weich	Steico Isorell	12,00	1,00	0,47	-0,98	0,91	0,00	0,41
		Holzfaserdämmplatte, 2x	Steico Base, 2x	40,00	1,00	3,83	-10,82	10,33	0,00	3,34
		Holz-Lehm-Schüttung	Naturefloor	104,00	1,00	1,47	-36,17	36,50	0,00	1,80
		Dampfsperre	Siga Wetguard	0,15	1,00	0,45	0,00	1,12	0,00	1,57
		Spanplatte	Pfleiderer Premium Board	20,00	1,00	3,42	-19,80	19,91	0,00	3,54
		BSH	BSH Kiefer	300,00	1,00	9,52	-42,79	43,48	0,00	10,21
		Zellulose Einblasdämmung	Isoflocdämmung	300,00	1,00	2,34	-19,79	20,19	0,00	2,74
		Zementbauplatte	Knauf-Perlite Aquapanel Cement	12,50	1,00	4,60	0,00	0,22	-0,02	4,80
		Rezyklierte Gesteinskörnung	Rezyklierte Gesteinskörnung	10,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		PE-Folie	PE-Folie	0,15	1,00	1,39	0,00	1,94	0,00	3,34
TRAGENDE INNENWÄNDE	KONVENTION			**270,00**	**1,00**	**78,49**	**-0,04**	**3,91**	**0,00**	**82,36**
		Gipsputz		15,00	1,00	1,84	-0,02	0,25	0,00	2,07
		Kalksandstein MW		240,00	1,00	74,81	0,00	3,41	0,00	78,22
		Gipsputz		15,00	1,00	1,84	-0,02	0,25	0,00	2,07
	PROJEKT			**365,00**	**1,00**	**35,81**	**0,00**	**1,59**	**0,00**	**37,40**
		Lehmsteinmauerwerk	Lücking Lehmstein	365,00	1,00	35,81	0,00	1,59	0,00	37,40
GEBÄUDE-ABSCHLUSSWAND	KONVENTION			**480,00**	**1,00**	**88,61**	**-0,24**	**29,42**	**0,00**	**117,79**
		Gipsputz		15,00	1,00	1,84	-0,02	0,25	0,00	2,07
		Kalksandstein MW		200,00	1,00	62,34	0,00	2,84	0,00	65,18
		Mineralwolle		250,00	1,00	16,74	0,00	17,83	0,00	34,58
		WDVS (exkl. Dämmung)		15,00	1,00	7,69	-0,22	8,49	0,00	15,96
	PROJEKT			**596,70**	**1,00**	**28,37**	**-170,89**	**174,56**	**0,00**	**32,05**
		Wandstiele KVH	B&O Wandkieferstiele	125,00	1,00	10,33	-101,20	102,00	0,00	11,13
		Spanplatte	Pfleiderer Premium Board	22,00	1,00	3,77	-21,78	21,90	0,00	3,89
		Dampfbremse (sd=10)	PE-Folie	1,20	1,00	0,46	-0,01	1,57	0,00	2,02
		Gipsfaserplatte	Fermacell Gipsfaserplatte	12,50	1,00	2,31	-0,60	0,77	0,00	2,48
		Zellulose Einblasdämmung	Isoflocdämmung	200,00	1,00	1,56	-13,20	13,46	0,00	1,83
		Konstruktionsholz	KVH Kiefer	200,00	1,00	3,31	-32,39	32,64	0,00	3,56
		Gipsfaserplatte	Fermacell Gipsfaserplatte	36,00	1,00	6,64	-1,72	2,22	0,00	7,14
DECKE	KONVENTION			**353,25**	**1,00**	**120,10**	**-0,06**	**49,46**	**0,00**	**169,50**
		PVC Bodenbelag		2,00	1,00	8,24	-0,06	24,46	0,00	32,64
		Estrich		70,00	1,00	31,08	0,00	2,79	0,00	33,87
		PP Vlies		1,25	1,00	1,39	0,00	1,94	0,00	3,34
		EPS foam insulation RD24		80,00	1,00	6,14	0,00	17,39	0,00	23,52
		Stahlbeton		200,00	1,00	73,25	0,00	2,88	0,00	76,13
	PROJEKT			**265,32**	**1,00**	**36,95**	**-139,43**	**142,28**	**0,00**	**39,80**
		Dielenboden	Eichendiele, schädlingsbefallen	19,00	1,00	1,91	-21,28	21,70	0,00	2,33
		Lehmformplatte (inkl.FBH)	Lethermo (inkl. FBH)	45,00	1,00	3,75	0,00	0,17	0,00	3,92
		Vollholzkeilleisten	Vollholzkeilleisten, Kiefer	45,00	1,00	0,48	-4,74	4,77	0,00	0,52
		Holzfaserdämmplatte, weich	Steico Isorell	12,00	1,00	0,47	-0,98	0,91	0,00	0,41
		Holzfaserdämmplatte, 2x	Steico Base, 2x	40,00	1,00	3,83	-10,82	10,33	0,00	3,34
		Holz-Lehm-Schüttung	Naturefloor	104,00	1,00	1,47	-36,17	36,50	0,00	1,80
		Dampfsperre	Siga Wetguard	0,15	1,00	0,45	0,00	1,12	0,00	1,57
		Spanplatte	Pfleiderer Premium Board	20,00	1,00	3,42	-19,80	19,91	0,00	3,54
		BSH	BSH Kiefer	0,32	1,00	10,16	-45,64	46,37	0,00	10,90
		Lehmstein	Lücking Lehmformstein	0,14	1,00	10,99	0,00	0,49	0,00	11,47

Bewertungstabelle, Berechnung mit getrennter Darstellung der biogenen Kohlenstoffströme
Quelle: Eigene Berechnung, Bauhaus Erde

Transportbedingte Emissionen
Bewertungstabellen

BAUTEIL (Bezeichnung)	SYSTEMAUFBAU (oben nach unten/ innen nach außen)	PRODUKT (Name)	HERSTELLER (Firma)	ROHSTOFFGEW. (A1a) (Adresse)	ROHSTOFF TRA. (A1b) (Adresse)	ROHSTOFFVERAR. (A1c) (Adresse)	TRANSPORT (A2) (Distanz von A1 zu A3)	BAUSTOFFHERST. (A3) (Adresse)	TRANSPORT (A4) (Distanz von A3 zu Baustelle)
FUNDAMENT									
	Ra-Use Betonplatten, unbewehrt	-	-	-			-	-	-
	RC-Beton (Typ 1, 45% RC-Anteil)	Cemex	CEMEX Deutschland AG	Kalksteinbruch Rüdersdorf, 15562			5 km	Frankfurter Ch, 15562 Rüdersdorf	33 km
BODENPLATTE									
	Zellulose-Einblasdämmung	Isofloc LM Dämmung	Isofloc AG	Baden-Wüttenberg/ Bayern/ Schweiz	-	-	0 - 250 km (201 km)	Soorpark, 9606 Bütschwil, Schweiz	816 km
	BSH		GELO Timber GmbH Binderholz Obernst | Baruth GmbH Holzwerke Bullinger GmbH & Co. KG	Umkreis der jeweiligen Werke	0 - 100 km (69 km)	Binderholz: An d. Birkenpfuhlheide 1, 15837 Baruth/Mark Gelo Timber: Fa. GeloTimber Produktion	2/3: 76 km (Binderholz) 1/3: 378 km (Gelo Timber)	Holzwerke Bullinger GmbH & Co. KG, Ahornallee 7, 16818 Märkisch Linden	75 km
TRAGENDE INNENWAND									
	Lehmstein	Lehmstein 2DF und 3DF	August Lücking GmbH & Co. KG	Eggestraße 2, 34414 Warburg	-	-	0,4 km	Eggestraße 2, 34414 Warburg	449 km
GEBÄUDEABSCHLUSSWAND									
	KVH Kieferstielwand	B&O Wandkieferstiele	B&O Bau	Umkreis des Sägewerks	0-150 km	Binderholz: An d. Birkenpfuhlheide 1, 15837 Baruth/Mark	99 km	Nicolaus-August-Otto-Str. 8, 15236 Frankfurt (Oder)	101 km
	Zellulose-Einblasdämmung	Isofloc Dämmung	Isofloc AG	Baden-Wüttenberg/ Bayern/ Schweiz	-	-	0 - 250 km	Soorpark, 9606 Bütschwil, Schweiz	818 km
	KVH		GELO Timber GmbH Binderholz Obernst | Baruth GmbH Holzwerke Bullinger GmbH & Co. KG	Umkreis des Sägewerks	0-150 km	Binderholz: An d. Birkenpfuhlheide 1, 15837 Baruth/Mark	99 km	Nicolaus-August-Otto-Str. 8, 15236 Frankfurt (Oder)	101 km
GESCHOSSDECKE									
	Lehmformstein	Lehmdeckenstein	August Lücking GmbH & Co. KG	Eggestraße 2, 34414 Warburg			0,4 km	Eggestraße 2, 34414 Warburg	449 km
	BSH Deckenbalken		B&O Bau	Umkreis der jeweiligen Werke	0 - 100 km (69 km)	Binderholz: An d. Birkenpfuhlheide 1, 15837 Baruth/Mark Gelo Timber: Fa. GeloTimber Produktion	2/3: 76 km (Binderholz) 1/3: 378 km (Gelo Timber)	Holzwerke Bullinger GmbH & Co. KG, Ahornallee 7, 16818 Märkisch Linden	75 km

Analyse der projektspezifischen Transportwege
Quelle: Eigene Auswertung, Bauhaus Erde

Bauteil (Bezeichnung)	Primärbaustoff (Bezeichnung)	Rohdichte (frisch) (kg/m³)	Rohdichte (luftgetrocknet) (kg/m³)	Menge (m³/m² Bauteil)	Menge (frisch) (kg/m2 Bauteil)	Menge (getrocknet) (kg/m2 Bauteil)	Fahrzeug (Bezeichnung)	Transportgut (Bezeichnung)	Emissionen (g CO2e/tKm)	Transportweg (A1b) (km A1a-A1c)	Emissionen (A1b) (kg CO2e/m2 Bauteil)	Transportweg (A2) (km A1 -A3)	Emissionen (A2) (kg CO2e/m2 Bauteil)	Transportweg (A4) (km A3 -A5)	Emissionen (A4) (kg CO2e/m2 Bauteil)	Transportweg gesamt (km A1 -A5)	Emissionen gesamt (kg CO2e/m² Bauteil)	Emissionen gesamt (Kg CO2e/m2 Material)	Emissionen pro m³/km (g CO2e/m³Km)
FUNDAMENT	Reuse Beton	-	-	-					-							0	**0,00**	0,00	0,00
BODENPLATTE	Zellulose-Einblasdämmung	-	50,00	0,24	-	12,00	Lkw 12-24 t	Volumengut	185,00	-	-	201,00	0,45	816,00	1,81	1017	**2,26**	9,41	9,25
	BSH Träger	815,00	520,00	0,06	48,90	31,20	Lkw 12-24 t	Massengut	85,00	60,00	0,25	176,67	0,47	75,00	0,20	312	**0,92**	15,28	49,03
INNENWAND	Lehmstein	1800,00	2000,00	0,31	558,45	620,50	Lkw 12-24 t	Massengut	85,00	-	-	0,40	0,02	449,00	23,68	449	**23,70**	76,40	170,00
GEBÄUDEABSCHLUSSWAND	KVH Kieferstielwand	815,00	520,00	0,13	101,88	65,00	Last-/Sattelzug 24-40 t	Massengut	59,00	75,00	0,45	99,00	0,55	101,00	0,56	275	**1,56**	9,74	35,43
	Zellulose-Einblasdämmung	-	50,00	0,18	-	8,80	Lkw 12-24 t	Volumengut	185,00	-	-	201,00	0,33	816,00	1,33	1017	**1,66**	9,41	9,25
	KVH	815,00	520,00	0,02	19,56	12,48	Lkw 12-24 t	Massengut	85,00	75,00	0,12	99,00	0,11	101,00	0,11	275	**0,34**	14,04	51,04
GESCHOSSDECKE	Lehmformstein	1800,00	1673,60	0,08	151,20	140,58	Lkw 12-24 t	Massengut	85,00	-	-	0,40	0,01	449,00	5,37	449	**5,37**	63,93	142,27
	BSH Deckenbalken	815,00	520,00	0,17	135,62	86,53	Lkw 12-24 t	Massengut	85,00	60,00	0,69	176,67	1,30	75,00	0,55	312	**2,54**	15,28	49,03

Berechnung der transportbedingten Treibhausgasemissionen
Quelle: Eigene Berechnung, Bauhaus Erde

Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen pro Tonnenkilometer					
Verkehrsmittel/ Fahrz	Energie	Einheit	Volumengut	Durchschnittsgut	Massengut
Lkw < 7,5 t	Diesel	g CO2e/tkm	412	229	185
Lkw 7,5 – 12	Diesel	g CO2e/tkm	318	179	147
Lkw 12-24 t	Diesel	g CO2e/tkm	185	106	85
Last-/Sattelzug 24-40	Diesel	g CO2e/tkm	112	68	59
Zug mit Elektrotraktio	Bahnstrom	g CO2e/tkm	24	18	16
Zug mit Dieseltraktio	Diesel	g CO2e/tkm	32	26	24
Containerschiff	Schweröl	g CO2e/tkm	30	17	13
Massengutfrachter	Schweröl	g CO2e/tkm	x	x	6
Binnenschiff	Diesel	g CO2e/tkm	x	x	34
Frachtflugzeug	Kerosin	g CO2e/tkm	531	x	x
Belly-Fracht	Kerosin	g CO2e/tkm	926	x	x

Verwendete Well-to-Wheel-Emissionsfaktoren nach Verkehrsmittel und Auslastung
Quelle: Eigene Darstellung nach Schmied und Knörr [SK12]

Zirkularität
Bewertungstabellen

BAUTEIL	SYSTEMAUFBAU	DICKE	MENGENANTEIL	MATERIALIEN		MATERIALHERKUNFT		DEMONTAGEFÄHIGKEIT		WERKSTOFF. VERWERTUNG		WIEDERVERWENDUNG	
(Bezeichnung)	*(oben nach unten/ innen nach außen)*	*(mm)*	*(Volumenanteil %)*	*Bewertung*	*(Volumenanteil %)*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*
FUNDAMENT													
	Re-Use Betonplatten, unbewehrt	750	71	Mineralisch	71	Wiederverwendung (Reuse/Repurpose/Remanufacturing)	71	Demontage mit hohem Aufwand	18	Eingeschränkt trennbar	18	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	29
	RC-Beton (Typ 1, 45% RC-Anteil)	250	24	Mineralisch	24	Weiterverwendung (Open-Loop-Recycling)	12	Demontage mit hohem Aufwand	6	Eingeschränkt trennbar	6	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	10
	RC-Gesteinskörnung, ungebunden	50	5	Mineralisch	5	Weiterverwendung (Open-Loop-Recycling)	2	Demontage mit hohem Aufwand	1	Eingeschränkt trennbar	1	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	2
		1050	100%		100%		85,7		25,0		25,0		40,0
BODENPLATTE													
	Dielenboden Eiche	20	3	Biobasiert	3	Primärrohstoff erneuerbar	2	Demontage mit einfachem Werkzeug	2	Sortenrein manuell trennbar	3	Direkte Wiederverwendung	3
	Lehmformplatte (inkl. FBH)	45	7	Mineralisch	7	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	5	Maschinell trennbar, hochwertige Qualität	5	Werkstoffliche Wiederverwendung (Closed-Loop-Recycling)	5
	Holzweichfaserdämmplatte	50	8	Biobasiert	8	Primärrohstoff erneuerbar	6	Demontage mit einfachem Werkzeug	6	Sortenrein manuell trennbar	8	Thermische Verwertung - erneuerbar	3
	Holz-Lehmschüttung	103	16	Biobasiert/Mineralisch	16	Primärrohstoff erneuerbar	12	Demontage mit spezieller Werkzeug	8	Maschinell trennbar, hochwertige Qualität	12	werkstoffliche Wiederverwendung (Closed-Loop-Recycling)	12
	Dampfsperre (sd=1500)	0,12	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Holzwerstoffplatte	22	3	Biobasiert	3	Primärrohstoff erneuerbar	3	Demontage mit einfachem Werkzeug	3	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Thermische Verwertung - erneuerbar	1
	Zellulose-Einblasdämmung	300	37	Biobasiert	37	Weiterverwendung (Open-Loop-Recycling)	18	Demontage mit einfachem Werkzeug	28	Sortenrein manuell trennbar	37	Thermische Verwertung - erneuerbar	15
	BSH	300	9	Biobasiert	9	Primärrohstoff erneuerbar	7	Demontage mit einfachem Werkzeug	7	Sortenrein manuell trennbar	9	Direkte Wiederverwendung	9
	Zementbauplatte	12	2	Mineralisch	2	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	1
	RC-Gesteinskörnung	100	15	Mineralisch	15	Weiterverwendung (Closed-Loop-Recycling)	11	Werkzeuglose Demontage	15	Maschinell trennbar, hochwertige Qualität	11	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	9
	PE Folie	0,12	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Werkzeuglose Demontage	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	0
		652,24	100%		100%		**59,2**		**74,0**		**85,2**		**58,4**
INNENWAND													
	Lehmstein/Lehmmörtel	365	100	Mineralisch	100	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	75	Sortenrein manuell trennbar	100	Werkstoffliche Wiederverwendung (Closed-Loop-Recycling)	75
		365	100%		100%		0,0		75,0		100,0		75,0
GEBÄUDEABSCHLUSSWAND													
	Kieferstielwand	125	32	Biobasiert	32	Primärrohstoff erneuerbar	24	Demontage mit einfachem Werkzeug	24	Sortenrein manuell trennbar	32	Direkte Wiederverwendung	32
	Holzwerstoffplatte	22	6	Biobasiert	6	Primärrohstoff erneuerbar	4	Demontage mit einfachem Werkzeug	4	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Thermische Verwertung - erneuerbar	2
	Dampfbremse (sd=10)	0,12	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Gipsfaserplatte	12,5	3	Mineralisch	3	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	1	Eingeschränkt trennbar	1	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	1
	Zellulose-Einblasdämmung	200	40	Biobasiert	40	Weiterverwendung (Open-Loop-Recycling)	20	Demontage mit speziellem Werkzeug	20	Sortenrein manuell trennbar	40	Thermische Verwertung - erneuerbar	16
	KVH	200	10	Biobasiert	10	Primärrohstoff erneuerbar	8	Demontage mit einfachem Werkzeug	8	Sortenrein manuell trennbar	10	Direkte Wiederverwendung	10
	Gipsfaserplatte	36	9	Mineralisch	9	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	2	Eingeschränkt trennbar	2	stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	4
		395,62	100%		100%		55,7		58,7		85,2		65,0
GESCHOSSDECKE													
	Dielenboden Eiche	20	5	Biobasiert	5	Primärrohstoff erneuerbar	4	Demontage mit einfachem Werkzeug	4	Sortenrein manuell trennbar	5	Direkte Wiederverwendung	5
	Lehmformplatte (inkl. FBH)	45	12	Mineralisch	12	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	9	Maschinell trennbar, hochwertige Qualität	9	Direkte Wiederverwendung	12
	Holzweichfaserdämmplatte	50	13	Biobasiert	13	Primärrohstoff erneuerbar	10	Demontage mit einfachem Werkzeug	10	Sortenrein manuell trennbar	13	Thermische Verwertung - erneuerbar	5
	Hanf-Lehmschüttung	103	27	Biobasiert/Mineralisch	27	Primärrohstoff erneuerbar	20	Demontage mit speziellem Werkzeug	14	Maschinell trennbar, hochwertige Qualität	20	Werkstoffliche Wiederverwendung (Closed-Loop-Recycling)	20
	Holzwerstoffplatte	22	6	Biobasiert	6	Primärrohstoff erneuerbar	4	Demontage mit einfachem Werkzeug	4	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Thermische Verwertung - erneuerbar	2
	Lehmformstein	140	29	Mineralisch	29	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Werkzeuglose Demontage	29	Sortenrein manuell trennbar	29	Direkte Wiederverwendung	29
	BSH	140	7	Biobasiert	7	Primärrohstoff erneuerbar	6	Demontage mit einfachem Werkzeug	6	Sortenrein manuell trennbar	7	Direkte Wiederverwendung	7
		380	100%		100%		44,0		75,6		84,5		81,9

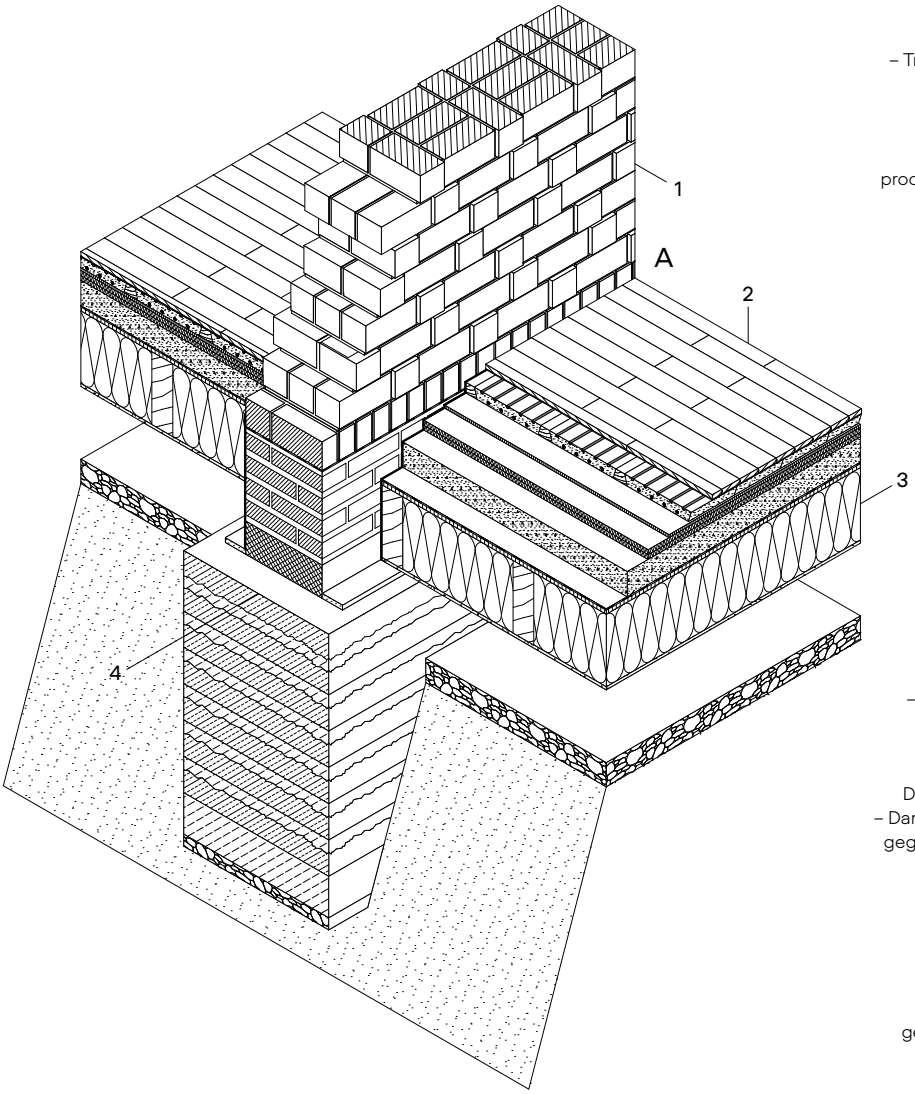
Zirkularitätsbewertung der HLH-Bauteile
Quelle: Eigene Bewertung, Bauhaus Erde

BAUTEIL	SYSTEMAUFBAU	DICKE	MENGENANTEIL	MATERIALIEN		MATERIALHERKUNFT		DEMONTAGEFÄHIGKEIT		WERKSTOFF. VERWERTUNG		WIEDERVERWENDUNG	
(Bezeichnung)	*(oben nach unten/ innen nach außen)*	*(mm)*	*(Volumenanteil %)*	*Bewertung*	*(Volumenanteil %)*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*	*Bewertung*	*0 - 100 Punkte nach Volumenanteil*
FUNDAMENT													
	Beton, unbewehrt	1000	95	Mineralisch	95	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	24	Eingeschränkt trennbar	24	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	57
	Sauberkeitsschicht Kies	50	5	Mineralisch	5	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	1	Sortenrein manuell trennbar	5	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	2
		1050	**100%**		**100%**		**0,0**		**25,0**		**28,6**		**59,0**
BODENPLATTE													
	PVC Belag, geklebt	20	3	Synthetisch	3	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Estrich	70	10	Mineralisch	10	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Eingeschränkt trennbar	3	Werkstoffliche Wiederverwendung (Closed-Loop-Recycling)	8
	PE Folie	0,12	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	MiWo	25	4	Mineralisch	4	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	3	Eingeschränkt trennbar	1	Entsorgung	0
	EPS blaugelb	300	44	Synthetisch	44	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Bitumen Membran	0,4	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Stahlbeton	200	29	Mineralisch	29	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	7	Eingeschränkt trennbar	7	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	18
	Sauberkeitsschicht Kies	70	10	Mineralisch	10	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	8	Sortenrein manuell trennbar	10	Direkte Wiederverwendung	10
		685,52	**100%**		**100%**		**0,0**		**17,7**		**21,0**		**35,4**
INNENWAND													
	Gipsputz	15	6	Mineralisch	6	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	2
	Sandkalkstein MW	240	89	Mineralisch	89	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	22	Eingeschränkt trennbar	22	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	53
	Gipsputz	15	6	Mineralisch	6	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	2
		270	**100%**		**100%**		**0,0**		**0,0**		**0,0**		**57,8**
GEBÄUDEABSCHLUSSWAND													
	Gipsputz	15	3	Mineralisch	3	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	1
	Sandkalkstein MW	200	42	Mineralisch	42	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	10	Eingeschränkt trennbar	10	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	25
	Mineralwolle	250	52	Mineralisch	52	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit einfachem Werkzeug	39	Eingeschränkt trennbar	13	Entsorgung	0
	WDVS (exkl. Dämmung)	15	3	Mineralisch	3	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	1	Eingeschränkt trennbar	1	Entsorgung	0
		480	**100%**		**100%**		**0,0**		**50,3**		**24,2**		**26,3**
GESCHOSSDECKE													
	PVC Bodenbelag	20	5	Synthetisch	5	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Estrich	70	19	Mineralisch	19	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	5	Eingeschränkt trennbar	5	Stoffliche Verwertung mit Qualitätsminderung (Downcycling)	8
	PP Vlies	0,12	0	Synthetisch	0	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Keine Demontage möglich	0	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	EPS foam insulation RD25	80	22	Synthetisch	22	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	5	Untrennbar oder sehr aufwendig	0	Entsorgung	0
	Stahlbeton	200	54	Mineralisch	54	Primärrohstoff nicht erneuerbar	0	Demontage mit hohem Aufwand	14	Eingeschränkt trennbar	14	Stoffliche Verwertung (Open-Loop-Recycling)	32
		370,12	**100%**		**100%**		**0,0**		**23,6**		**18,2**		**40,0**

Zirkularitätsbewertung der konventionellen funktionalen Äquivalente
Quelle: Eigene Bewertung, Bauhaus Erde

Fügungspunkt A
Fundament | Bodenplatte | Lehmsteinmauerwerk

A
Fügungspunkt
Fundament | Bodenplatte | Lehmsteinmauerwerk
– Lehmsteinelemente (1) über Mauersperrbahn in Ebene Bodenplatte auf wiederverwendeten Reichsformatziegeln gestellt
– Darunter Kimmstein aus Schaumglas direkt auf Fundament aus Recyclingbetonplatten gemauert (4)
– Bodenplattenelemente (3) über feuchteresistenter Hartschaumplatte auf Fundamentkanten aufgelegt
– Bodenaufbau (2) auf Rohdecke schichtweise aufgebaut



1
Innenwand aus Lehmsteinmauerwerk
– Tragendes Sichtmauerwerk aus vorgefertigten Wandelementen
– 2DF und 3DF Lehmsteine, gemauert mit Lehmmörtel im Sonderverband
– Stehende Rollschicht aus produktionsauschussigen Klinkern, gemauert mit Zementmörtel als Havarieschutz
– Zurückgesetzte Lager- und Stoßfuge, herausgeschobene binderseitige Steine

2
Bodenaufbau
– Dielenboden Eiche (FNR gefördert) mit Insektenschadbild
– Lehmformplatte mit eingelegter Fußbodenheizung, verlegt in Trapezleisten zur verdeckten Verschraubung der Dielenböden und Lagesicherung der Lehmformteile
– Holzweichfaserplatten (dreilagig mit verschiedenen Festigkeiten) über Installationsebene aus verdichteter 3-lagig eingebrachter Holz-Lehm-Schüttung

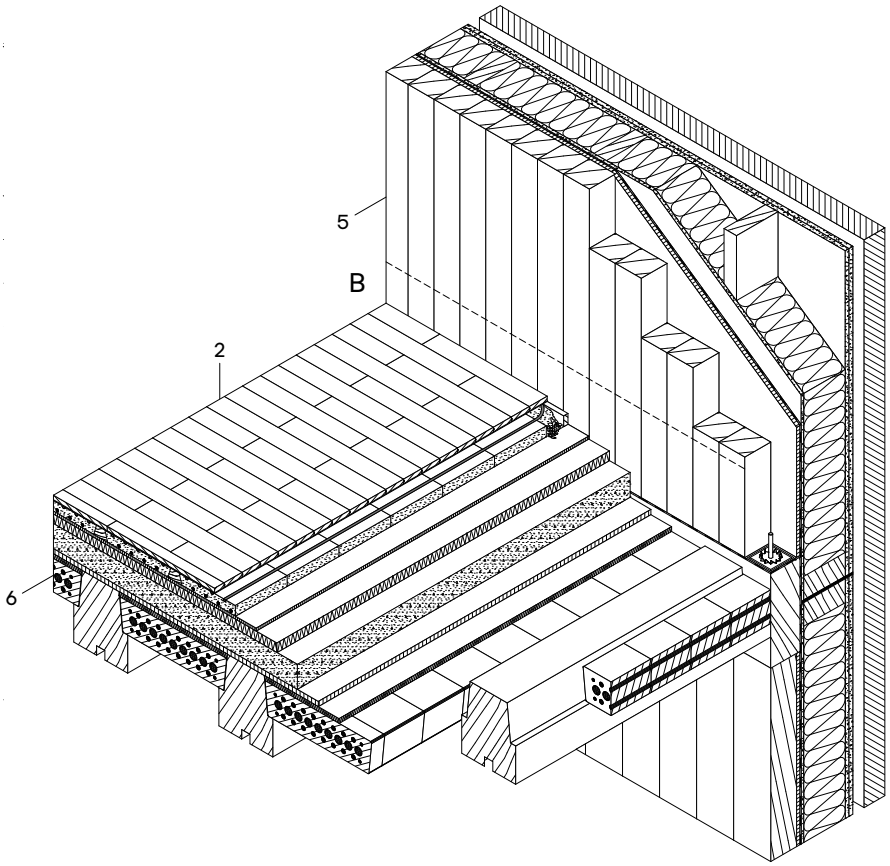
3
Bodenplatte
(aus Vorfertigung B&O Bau)
– Dampfbremse auf Holzwerkstoffplatte (50% Altholz), darunter Gefach aus BSH-Kiefer mit Zellulosedämmung ausgeblasen und mit feuchteresistenter Trockenbauplatte DIN-konform zum Kriechkeller abgeschlossen.
– Darunter mechanisch durchlüfteter Kriechkeller, gegen Boden Recyclingschotterschicht auf Folie nach DIN-Vorgabe

4
Unbewehrte Fundamente
– Betonplattenzuschnitte der Bestandsoberflächen Hof und Bodenplatte des Baugrundstücks, geschichtet mit Recyclingbeton als Mörtellage
– Darunter Recyclingschotter

Bauteilfügung A
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

Fügungspunkt B
Geschossdecke | Gebäudeabschlusswand

B
Fügungspunkt
Gebäudeabschlusswand | Geschossdecke
– Gebäudeabschlusswand (5) Erdgeschoss und Obergeschoss mit Rähm aus BSH-Kiefer und Querschubverbindern gefügt
– Deckenbalken Geschossdecke (6) mit Metallsteckverbinder an Rähm verbunden
– Lehmformsteine und weiterer Decken-Bodenaufbau (2) ergänzt



2
Bodenaufbau
– Dielenboden Eiche (FNR gefördert) mit Insektenschadbild
– Lehmformplatte mit eingelegter Fußbodenheizung, verlegt in Trapezleisten zur verdeckten Verschraubung der Dielenböden und Lagesicherung der Lehmformteile
– Holzweichfaserplatten (dreilagig mit verschiedenen Festigkeiten) über Installationsebene aus verdichteter 3-lagig eingebrachter Holz-Lehm-Schüttung

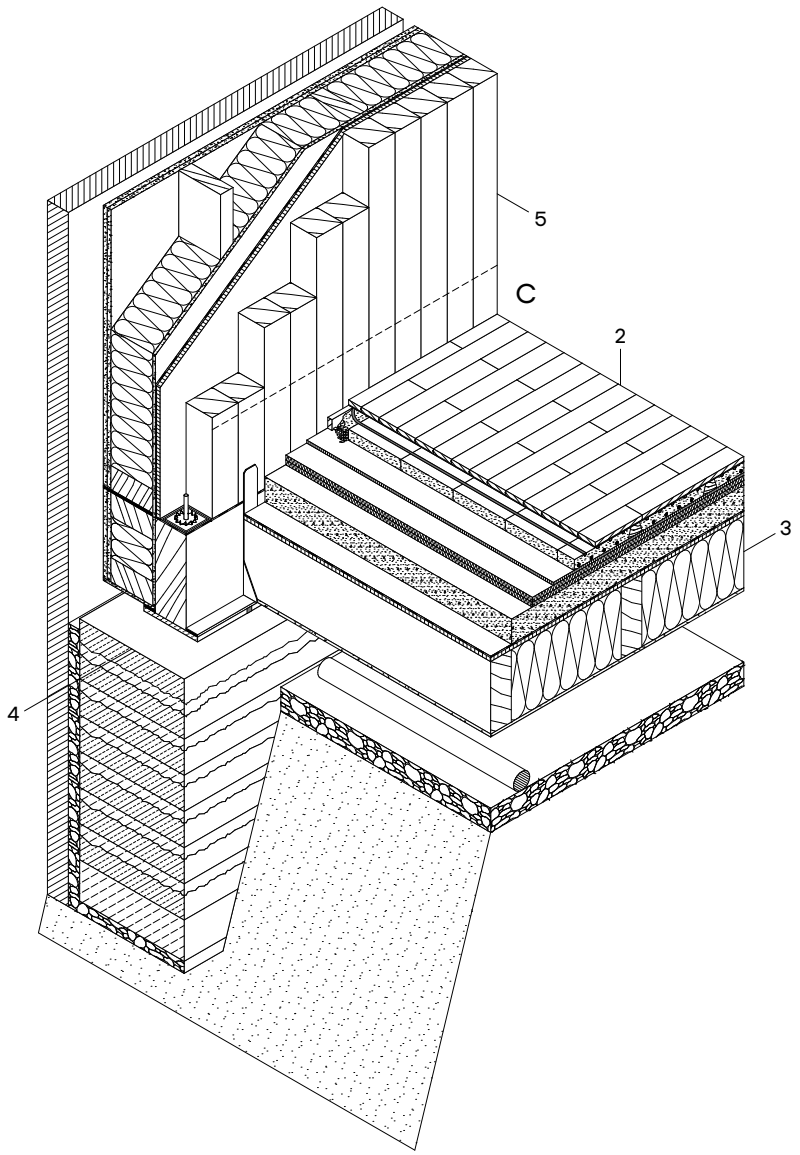
5
Gebäudeabschlusswand
(aus Vorfertigung B&O Bau)
– Kiefernstiele geklammert und mit Holzwerkstoffplatte aussteifend verbunden
– Dampfbremse
– Gefach aus Kiefer KVH mit Zelluloseeinblasdämmung gefüllt, beidseitig mit Gipsfaserplatten beplankt
– Elementstöße mit Mineralwolle gefüllt
– Luftschicht zur Nachbarbebauung

6
Geschossdecke
– Lehmeinhangsteine (Patent B&O Bau und Bauhaus Erde) zwischen passförmig abgebundenen Kiefer-BSH-Deckenbalken
– Holzwerkstoffplatte auf Balken
– Schafwolle in Hohlraum zwischen Lehmstein und Deckplatte

Bauteilfügung B
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

Fügungspunkt C
Fundament | Bodenplatte | Gebäudeabschlusswand

C
Fügungspunkt
Fundament | Bodenplatte | Gebäudeabschlusswand
– Schwellholz BSH-Kiefer auf feuchteresistenter Hartschaumplatte auf Fundament (4) aufgelegt
– Bodenplattenelemente (3), ebenfalls an Kante auf Hartschaumplatte aufgelagert, Luftdichtigkeit durch Kompriband
– Gebäudeabschlusswand (5) mittels in Schwellholz eingelassene Querschubverbinder abgestellt



2
Bodenaufbau
– Dielenboden Eiche (FNR gefördert) mit Insektenschadbild
– Lehmformplatte mit eingelegter Fußbodenheizung, verlegt in Trapezleisten zur verdeckten Verschraubung der Dielenböden und Lagesicherung der Lehmformteile
– Holzweichfaserplatten (dreilagig mit verschiedenen Festigkeiten) über Installationsebene aus verdichteter 3-lagig eingebrachter Holz-Lehm-Schüttung

3
Bodenplatte
(aus Vorfertigung B&O Bau)
– Dampfbremse auf Holzwerkstoffplatte (50% Altholz), darunter Gefach aus BSH-Kiefer mit Zellulosedämmung ausgeblasen und mit feuchteresistenter Trockenbauplatte DIN-konform zum Kriechkeller abgeschlossen.
– Darunter mechanisch durchlüfteter Kriechkeller, gegen Boden Recyclingschotterschicht auf Folie nach DIN-Vorgabe

4
Unbewehrte Fundamente
– Betonplattenzuschnitte der Bestandsoberflächen Hof und Bodenplatte des Baugrundstücks, geschichtet mit Recyclingbeton als Mörtellage
– Darunter Recyclingschotter

5
Gebäudeabschlusswand
(aus Vorfertigung B&O Bau)
– Kiefernstiele geklammert und mit Holzwerkstoffplatte aussteifend verbunden
– Dampfbremse
– Gefach aus Kiefer KVH mit Zelluloseeinblasdämmung gefüllt, beidseitig mit Gipsfaserplatten beplankt
– Elementstöße mit Mineralwolle gefüllt
– Luftschicht zur Nachbarbebauung

Bauteilfügung C
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

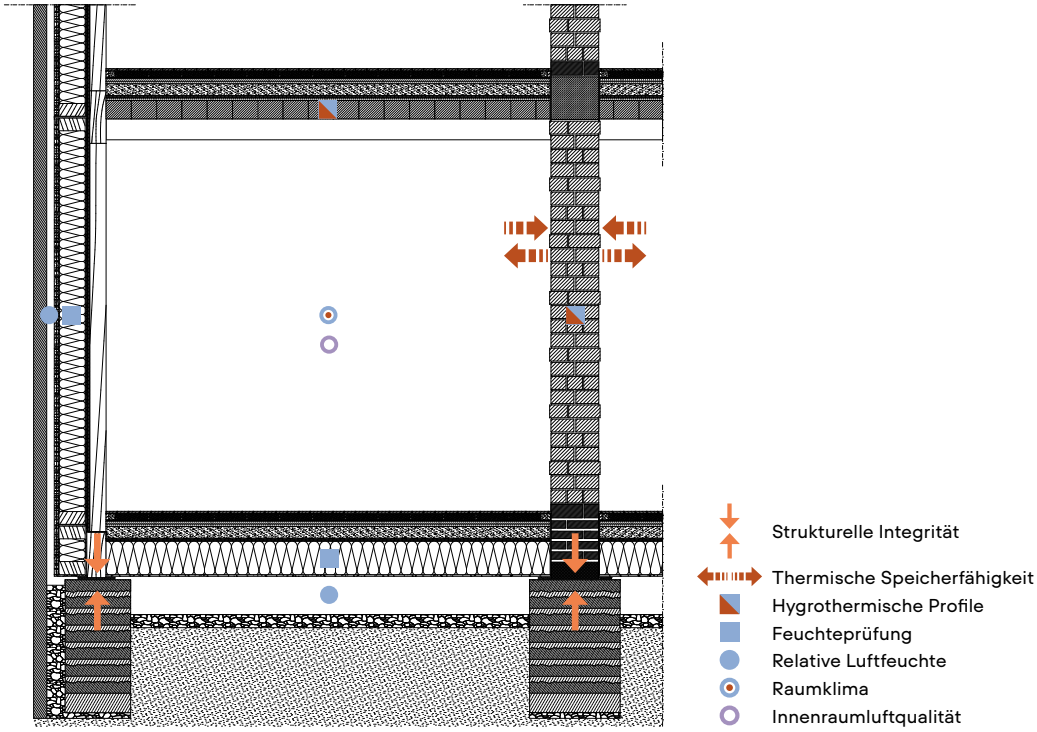
Anhang C

Monitoring

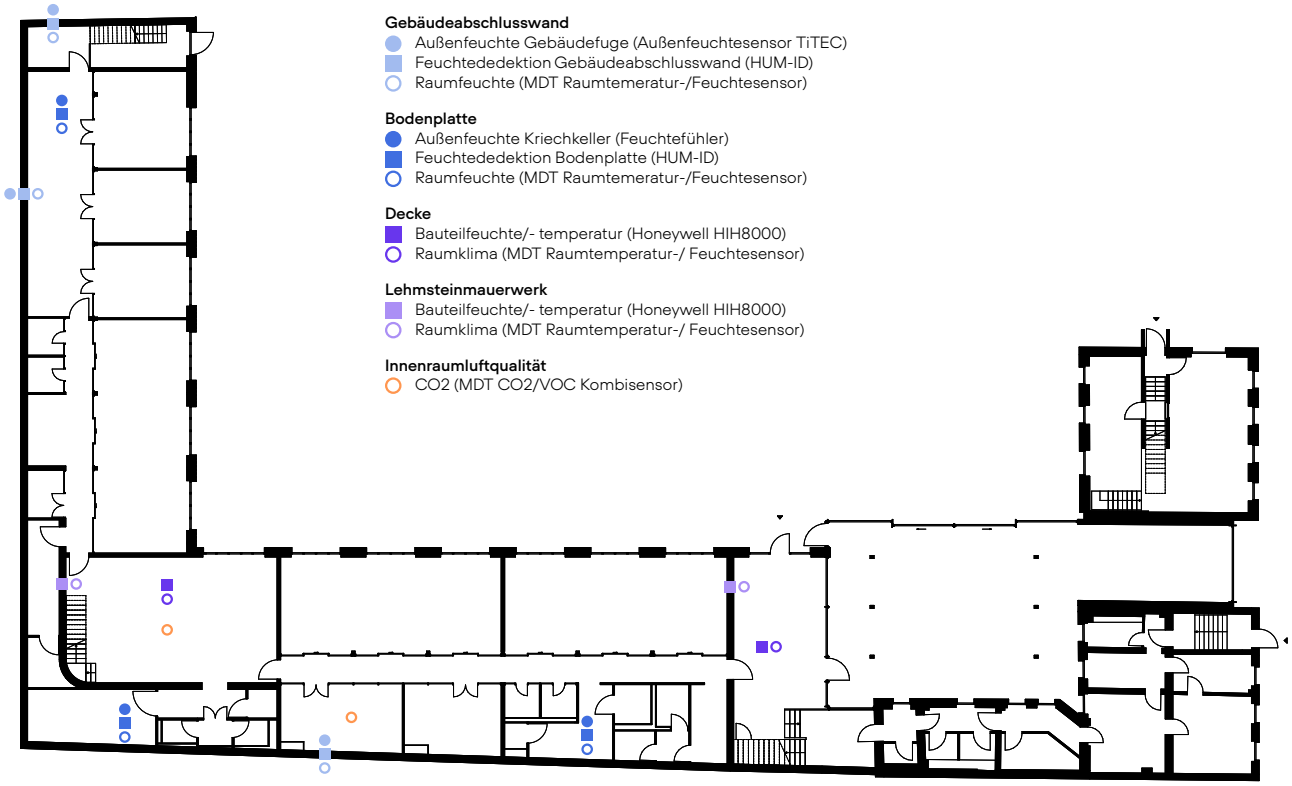
Messstrategie und Verortung

Zeitplan

Messgrößen und Verortung
Monitoringkonzept

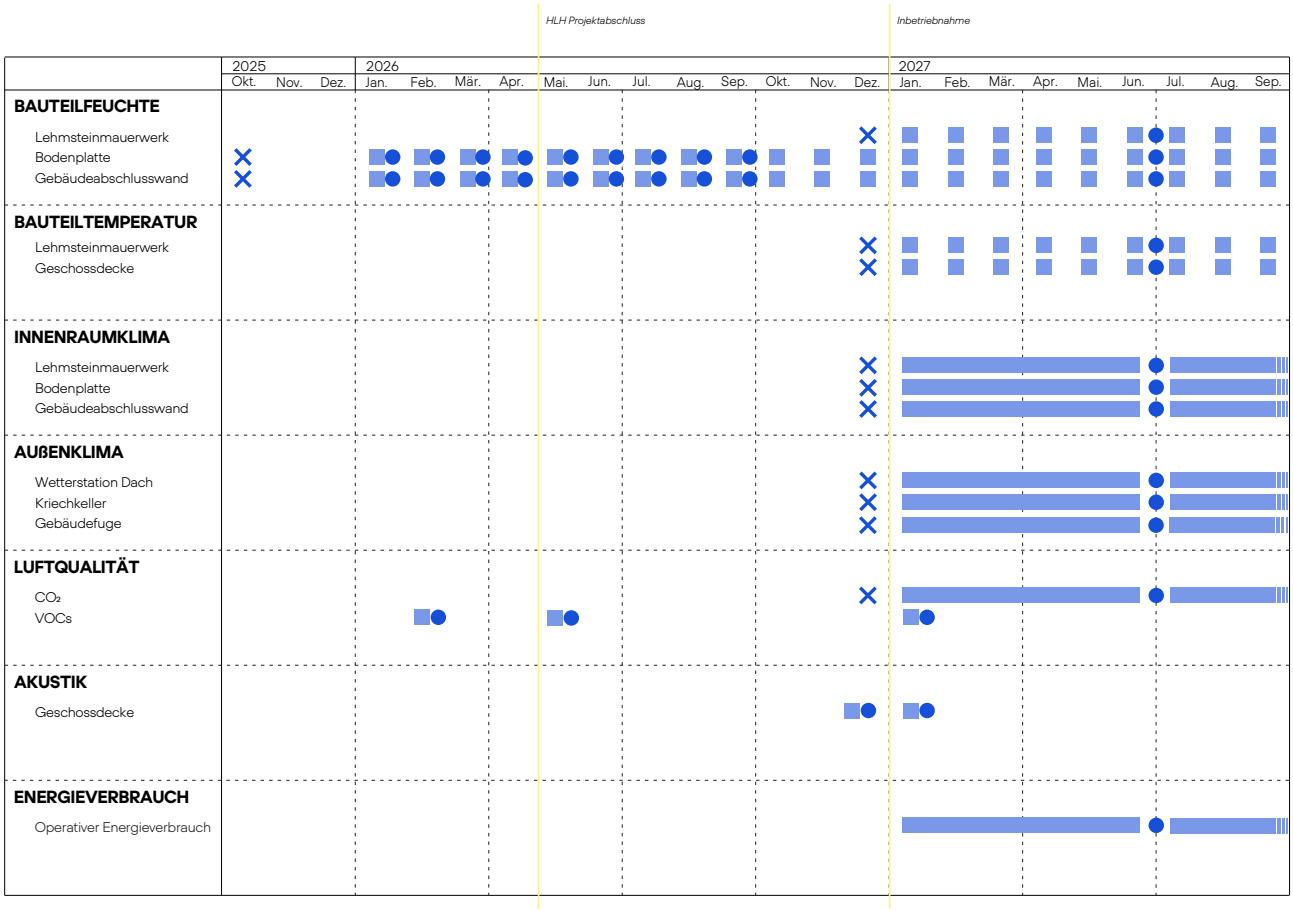


Bauteilbezogene Messgrößen und Untersuchungsbereiche
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde



Verortung der Messstellen im Grundriss
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

Monitoringzeitplan und Messaufbau
Monitoringkonzept



Monitoringzeitplan
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

MESSUNG	*BAUTEIL*	*MESSTECHNIK*	*VERORTUNG (GEBÄUDE)*	*MESSPUNKT (BAUTEIL)*
Bauteilfeuchte	Lehmsteinmauerwerk	Honeywell HIH8000 (digital)	NB_0.45_Gmr., NB_0.05_Foyer	5 Messtiefen
	Bodenplatte	HUM-ID Sensor	Revisionsklappen	Unter Bodenplatte (Außenseite)
	Gebäudeabschlusswand	HUM-ID Sensor	NB_0.40_Lager, NB_0.41 Trh., NB_0.21 Bespr.	Außenbereich Gebäudeabschlussw.
Bauteiltemperatur	Lehmsteinmauerwerk	Honeywell HIH8000 (digital)	NB_0.45_Gmr., NB_0.05_Foyer	5 Messtiefen
	Geschossdecke	Honeywell HIH8000 (digital)	NB_0.45_Gmr., NB_0.05_Foyer	Bauteilmitte (Lehmstein, Holzträger)
Innenraumklima	-	MDT Raumtemperatur- / Feuchtesensor	NB_0.45_Gmr., NB_0.05_Foyer	unmittelbare Nähe Bauteilfeuchte/-temperatur
Außenklima	Wetterstation	SCN-WS3 (MDT)	Dach	-
	Kriechkeller	Außenfeuchtesensor TiTEC ARFT/M-I/S	Revisionsklappen (Außen)	unmittelbare Nähe Bauteilfeuchte/-temperatur (Bodenplatte)
	Gebäudefuge	Außenfeuchtesensor TiTEC ARFT/M-I/S	NB_0.40_Lager, NB_0.41 Trh., NB_0.21 Bespr. (Außen)	unmittelbare Nähe Bauteilfeuchte/-temperatur (Gebäudeabschlussw.)
CO_2	-	MDT CO2 / VOC Kombisensor 55 [SCN-CO2MGS.02]	NB.027_Gmr., NB_0.21 Bespr.	-
VOCs	-	R070 VOC Screening TENAX	NB.027_Gmr., NB_0.21 Bespr.	-
Akustik	Geschossdecke	NTI Audio, XL2 Audio- & Akustik-Analysator	NB.113 / NB_0.05_Büro	-
			NB.128 / NB_0.27_Gmr.	-
			NB.111 / NB_0.20_Bspr.	-

Messaufbau nach Messgröße, Bauteil und Verortung
Quelle: Eigene Darstellung, Bauhaus Erde

Anhang D

Kommunikation und Transfer

Veranstaltungen, Vorträge und Publikationen

Veranstaltungen, Vorträge und Publikationen
Übersicht

Veranstaltungen, Ausstellungen und Vor-Ort-Formate

Datum / Zeitraum	Veranstaltung	Ort	Format und Projektbezug	Beteiligte Projektpartner*innen
25.–26.07.2024	GOLEHM-Innovationsforum	Halle	Fachlicher Austausch zur Qualifizierung des Monitoringkonzepts für Lehmbaustoffe	Forschungsgemeinschaft
25.10.2024–19.01.2025	draw love build	Akademie der Künste, Berlin	Beitrag zum HLH im Rahmen der Architekturausstellung	Vera Hartmann, Sauerbruch Hutton
07.11.2024	Baustellenbesuch der TU Dresden	Berlin	Baustellentour mit rund 40 Studierenden; Vermittlung von Forschungsansatz, Bauprozess und serieller Holzvorfertigung an drei thematischen Stationen	Stefan Anders und Friederike Münn, B&O Bau und Gebäudetechnik; Micha Kretschmann, Bauhaus Erde
27.01.2025	Veranstaltung der Bundesstiftung Baukultur	Berlin	Projektvortrag sowie Werkstattführung mit Besichtigung der HLH-Prototypen	Vera Hartmann, Sauerbruch Hutton, Friederike Münn, B&O Bau und Gebäudetechnik – Projektvortrag; Patricia Jeglitsch, Bauhaus Erde –
19.–21.05.2025	Deutscher Holzbaukongress	Berlin	Kick-off Lehmeinhangstein und Vorstellung des Forschungsvorhabens	B&O Bau und Gebäudetechnik, Bauhaus Erde
27.–29.06.2025	SPD-Bundesparteitag	Berlin	Vermittlung des Projekts anhand eines Materialmusters und projektbezogener Informationsmedien	Industrieverband Lehmbaustoffe und B&O Bau und Gebäudetechnik
16.07.2025	Grundsteinlegung des HLCB	Berlin	Öffentliche Präsentation des Bau- und Forschungsfortschritts sowie Austausch mit Projektbeteiligten und Fachöffentlichkeit	B&O Bau und Gebäudetechnik, Forschungsgemeinschaft
10.–11.09.2025	CONBAU Nord	Neumünster	Projektpräsentation im Rahmen der Fachveranstaltung	Industrieverband Lehmbaustoffe
10.–14.09.2025	NordBau	Neumünster	Präsentation des Forschungsvorhabens im Messekontext	Industrieverband Lehmbaustoffe
25.09.2025	Netzwerktreffen Built by Nature Germany	Berlin	Projektvorstellung und fachlicher Austausch zu naturbasierten Bauweisen	Bauhaus Erde
09.10.2025	Baustellenführung für die HOWOGE	Berlin	Vermittlung der entwickelten Bauteile und ihrer Umsetzung im realen Bauprozess	Sauerbruch Hutton und B&O Bau und Gebäudetechnik
11.03.2026	Richtfest des HLCB	Berlin	Präsentation des Baufortschritts und der realisierten Holz-, Lehm- und Re-Use-Konstruktionen	B&O Bau und Gebäudetechnik, Forschungsgemeinschaft
12.–16.05.2026	FORSCHEN, FORMEN, TRANSFORMIEREN	Holz-Lehmbau Campus Berlin	Ausstellung der Forschungsergebnisse anhand von Modellen, Demonstratoren, Materialproben, Plangrafiken, Analysen und Baustellendokumentationen; Vernissage und	Bauhaus Erde, B&O Bau und Gebäudetechnik, Sauerbruch Hutton
fortlaufend	Baustellen- und Gebäudebesichtigungen am HLCB	Berlin	Zielgruppenspezifische Vermittlung an Hochschulen, Wohnungswirtschaft, Bauunternehmen, Stiftungen, Förderinstitutionen und weitere Fachakteur*innen	wechselnde Vertreter*innen der Forschungsgemeinschaft

Vorträge und Konferenzbeiträge

Datum / Zeitraum	Veranstaltung	Ort	Format und Projektbezug	Beteiligte Projektpartner*innen
06.11.2024	BVSF Forum	Berlin	Vortrag mit Teilbeitrag zum Forschungsvorhaben	Stefan Anders, B&O Bau und Gebäudetechnik
13.11.2024	ReBuilt-Veranstaltung	Berlin	Vortrag und Workshop mit Teilbeitrag zum Forschungsvorhaben	Stefan Anders, B&O Bau und Gebäudetechnik
19.11.2024	Heinze Klimafestival	Berlin	Break-out-Session mit Vorstellung des Forschungsvorhabens	Ipek Ölçüm, Industrieverband Lehmbaustoffe
18.12.2024	Orientierungstag der HNE Eberswalde	Eberswalde	Vortrag mit Teilbeitrag zum Forschungsvorhaben	Stefan Anders, B&O Bau und Gebäudetechnik
20.01.2025	Grüne Woche	Berlin	Vortrag mit Teilbeitrag zum Forschungsvorhaben	Stefan Anders, B&O Bau und Gebäudetechnik
20.03.2025	Internationales Holzbausymposium	Berlin	Projektvortrag zum HLH	Micha Kretschmann, Bauhaus Erde
Juni 2025	Sustainable Built Environment Conference 2025 (SBE25)	ETH Zürich	Vorstellung der wissenschaftlichen Publikation zur Entwicklung, prototypischen Erprobung und ökologischen Bewertung der Holz-Lehm-Hybriddecke	Christian Gäth und Micha Kretschmann, Bauhaus Erde
21.06.2025	Shift – Global Architecture Movement: Activating Local Value Chains and Knowledge		Fachbeitrag zu lokalen Wertschöpfungsketten und Wissenstransfer mit Bezug zum Forschungsvorhaben	Vera Hartmann, Sauerbruch Hutton
24.07.2025	Bau mit Plan	Ampfing	Fachbeitrag zum Projekt und zum Einsatz von Lehmbaustoffen	Industrieverband Lehmbaustoffe
03.–04.10.2025	Think Earth – Earth Construction Forum	Rapperswil	Fachbeitrag zum Forschungsvorhaben im internationalen Lehmbaukontext	Industrieverband Lehmbaustoffe
15.10.2025	Masterstudiengang Holzbauingenieurwesen, HNE Eberswalde	Eberswalde	Hochschulvortrag „Integrale Planung am Beispiel HLCB“ mit Schwerpunkt auf der seriellen Fertigung in Frankfurt (Oder)	B&O Bau und Gebäudetechnik
10.–11.06.2026	Konvent der Baukultur 2026 – Forum 5 „Baustoffe gestalten“	Potsdam	Impulsvortrag zum HLH-Projekt und Einordnung der Forschungsergebnisse in aktuelle Debatten zu Baukultur und regenerativen Baustoffen	Patricia Jeglitsch, Bauhaus Erde

Publikationen und externe Berichterstattung

Datum / Jahr	Kategorie	Titel	Medium / Publikation	Autor*innen
Dezember 2025	Wissenschaftliche Publikation	From Vertical to Horizontal: Earth Blocks in Floor Plate Constructions	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1554 (2025), 012077	Christian Gäth, Micha Kretschmann, Prof. Dr. Philipp Misselwitz, Bauhaus Erde; Richard Lemke, August Lücking
Mai 2026	Fachpublikation	Transformation der Baustelle	Deutsche BauZeitschrift (DBZ)	Patricia Jeglitsch und Caroline Wolf, Bauhaus Erde
12.06.26	Externe Berichterstattung	Holz-Lehmbau Campus in Berlin: Baustelle und Forschungsprojekt	BauNetz Wissen Holz	BauNetz Wissen
12.06.26	Externe Berichterstattung	Ein Bauauftrag wird Reallabor: Der Holz-Lehmbau Campus Berlin	BauNetz CAMPUS	Sorana Radulescu, BauNetz
15.06.26	Externe Berichterstattung	Reallabor in Berlin: Das Haus als Materiallager	DETAIL	Nora Good, DETAIL

Holz-Lehm-Hybrid
Reallabor für regeneratives und zirkuläres Bauen in der Region Berlin-Brandenburg

Gefördert durch
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DBU-Az. 39497/01

Kontakt
Bauhaus der Erde gGmbH
Oberlandstraße 26–35
12099 Berlin
contact@bauhauserde.org

Berlin, August 2026

Foto: Jan Bitter