

EPIZENTRUM BAUWENDE – Experimentalarchitektur für Potsdam

Ein Projekt von Bauhaus Erde

Zeitraum: Juni – Dezember 2022

Abschlussbericht

Fördermittelgeber*in: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller: Bauhaus der Erde gGmbH

Geschäftsführer: Prof. Dr. mult. Hans Joachim Schellnhuber & Prof. Dr. Philipp Misselwitz

Projektleiter*innen: Claudia Bode & Angelika Drescher

Projektbeteiligte: Bauhaus Erde gGmbH, TU Berlin – Institut für Ökologie, TU Berlin – FG
Kreislaufwirtschaft & Recyclingtechnologie, TU Berlin – Natural Building Lab, Hochschule für nachhaltige
Entwicklung Eberswalde (HNEE), ZUSAMMENKUNFT Berlin eG mit Material Mafia, Kunst-Stoffe e.V.,
Baufachfrauen e.V. & MITKUNSTZENTRALE, ZRS Ingenieure & Architekten

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis:	2
Abbildungsverzeichnis:	3
Tabellenverzeichnis:	4
Glossar:	5
1. Zusammenfassung	8
2. Einleitung	9
3. Hauptteil	12
3.1 Potentialanalyse regional verfügbarer regenerativer Baumaterialien (AP 1)	12
3.2 Potentialanalyse regional verfügbarer Sekundärrohstoffe und Chancen, Strukturen und Narrative der Kreislaufwirtschaft in Berlin und Brandenburg (AP 2)	29
3.2.1 Arbeitspaket 2.1: Stoffstromanalyse und regionale Wertschöpfungsketten	31
3.2.2 Arbeitspaket 2.2: Narrative einer regionalen Kreislaufwirtschaft: Prototypen zur Untersuchung und Diskussion von Wieder- und Weiterverwendungsprozessen im Bau	45
3.2.3 Zusammenfassung und Diskussion	53
3.2.4 Rechtsquellenverzeichnis	54
3.3 CO₂-Lebenszyklus (AP 3)	56
3.3.1. Einleitung	56
3.3.2. Erreichung und Abweichungen von den Meilensteinen	56
3.3.3. Zusammenarbeit mit AP 2	58
3.3.4. Alternativmeilensteine	58
3.3.5. Fazit	59
3.4 Life Cycle Design/ Lebenszyklusdesign (AP 4)	60
3.4.1 Grundlagen, Anforderungen, Entwurf	60
3.4.2 Entwurfsbeschreibung	61
3.4.4 Entwurfsprozess	66
3.4.5 Reflektion, Nächste Schritte	67
3.5 Assoziierte Masterarbeit: Potentialanalyse Lehm	68
3.5.1. Einleitung	68
3.5.2. Teil A: Theoretische Einführung	68
3.5.3. Teil B: Praktische Überprüfung	73
3.5.4. Teil C: Anwendungspotentiale	76
3.6 Grüne Beschaffung-Prozesssicherung (AP 5)	78
3.6.1. Prozesssicherung	78
3.6.2. Nachhaltige Baulandbeschaffung	81
3.6.3. Vorbereitung Konzept für eine frühzeitige Nutzer*innenbeteiligung	82
3.6.4. Empfehlung nächste Schritte und Übertragbarkeit auf andere Bauvorhaben	84
3.7 Partnernetzwerk, Öffentlichkeitsarbeit (AP 6)	85
4. Fazit und Handlungsempfehlungen	86
Literaturverzeichnis	89
2. Einleitung	89
3. Hauptteil	89
Anhangverzeichnis	100

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Regeneratives Design, Gäth, Kretschmann, 2023

Abbildung 2: Entwicklung des Holzeinschlags in Brandenburg seit 2007 nach Holzartengruppen

Quelle: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2021

Abbildung 3: BWI-Nutzung und Potenzial der Holzartengruppe Kiefer nach Land und Periode

Quelle: BMEL 2016

Abbildung 4: Schematische Darstellung von Stoffflüssen im Rahmen des Zirkuläres Bauen

Abbildung 5: Infobox EoL Altholz, Beton und Bauschutt sowie Flachglas

Abbildung 6: Zu den betrachteten Abfallströmen Altholz, Beton und Bauschutt und Flachglas zugehörige

Abfallschlüssel

Abbildung 7: Akteure und Rahmenbedingungen einer kreislaufgerechten ressourcenschonenden

Bauwirtschaft

Abbildung 8: Altholzaufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2015 in Mg, eigene Darstellung

nach [Ste2019]

Abbildung 9: Bauschutttaufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2012 in Mg [Ste2019]

Abbildung 10: Flachglasabfallaufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2016 in Mg, eigene

Darstellung nach [Ros2019]

Abbildung 11: Massenströme Altholz in Berlin 2020 in Mg, eigene Darstellung nach (Vogt, Harju, Gonser

Dezember 2021)

Abbildung 12: Massenströme Beton und Bauschutt in Berlin 2020 in Mg, eigene Darstellung nach (Vogt,

Harju, Gonser Dezember 2021)

Abbildung 13: Verbaute Materialmengen, verbaute CO₂-Emissionen (embodied carbon) und physisch

gebundener Kohlenstoff (stored carbon) im Gebäude- und Infrastrukturbestand Berlin 2020

Abbildung 14: Transformationsstrategien der Prototypen

Abbildung 15: Der Kohlenstoffgehalt von Materialien auf Biomassebasis ist mit grünen Balken dargestellt.

Der Kohlenstoffgehalt von Materialien auf mineralischer Basis ist mit schwarzen Balken dargestellt. Der

Kohlenstoffgehalt von Stein liegt unter 1 % und ist in dieser Abbildung nicht enthalten.

Abbildung 16: Umwandlungen von Holz in Wald und Stadt und der damit verbundene

Kohlenstoffkreislauf. Eine Beschreibung der Vergrößerung der Kreise findet sich im Anhang.

Abbildung 17: Optimales Korngerüst für gepresste Lehmsteine, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 18: Gewinnung von Sand im Tagebau, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 19: Baugrube, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 20: Mapping der ausgewählten Böden im Bodendreieck, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 21: Korrelation von Tongehalt und Druckfestigkeit, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 22: CO₂-Äquivalentkennwertvergleich, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 23: Innenwand, tragend, Gaeth und Kretschmann, 2023

Abbildung 24: Außenwand, tragend, gedämmt, Gaeth und Kretschmann, 2023

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Gesamteinschlag im Landesbetrieb Forst Brandenburg nach Verkaufssortimenten und Jahren

Tabelle 2: Induktiv gebildetes Kategoriensystem (links) und Beschreibung (rechts)

Tabelle 3: Darstellung von beteiligten Initiativen aus dem HdM inklusive der entwickelten prototypischen Anwendungen

Tabelle 4: Volumen, Dichte, Kohlenstoffemissionen und Lagerung von Holzmaterialien und Erdblocken, die für die Konstruktion des Pavillons verwendet werden könnten.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Prüfungsergebnisse nach DIN 18945_Gaeth und Kretschmann 2023

Glossar:

Abfall	Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung (gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012).
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
Agroforst	Die Agroforstwirtschaft, häufig auch mit dem Begriff „Agroforst“ abgekürzt, bezeichnet eine Landnutzungsform, bei der Gehölze in Kombination mit landwirtschaftlichen oder gärtnerischen Kulturen und / oder mit der Haltung von Nutztieren angebaut werden (gemäß DeFAF, 2023)
AltholzV	Altholzverordnung
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
Baulehm	Zur Herstellung von Lehmbaustoffen geeigneter Lehm (gemäß DIN 18942-1-2018).
Bauprodukt	Baustoffe, Bauteile und Anlagen, die hergestellt werden, um dauerhaft in baulichen Anlagen eingebaut zu werden (Bauprodukteverordnung)
Baustoff/Baumaterial	zum Bauen geeignetes und verwendetes Material, z.B. Holz, Beton, Flachglas (www.bauprofessor.de)
Bauteil	besteht aus Baustoffen, bildet eine Einheit, z.B. Wand, Fenster, Tür (www.bauprofessor.de)
CO₂	Kohlenstoffdioxid (eng.: Carbon dioxide)
EfbV	Entsorgungsfachbetriebsverordnung
EoL	end of life
Gepresster Lehmstein	Ungebranntes, in der Regel quaderförmiges Lehmbauprodukt aus Baulehm, welches im erdfeuchten Zustand gepresst wird und dessen alleiniges Bindemittel die Tonfraktion ist (in Anlehnung an DIN 18942-1-2018).
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
Hochwertiges Baustoffrecycling	keine offizielle bzw. konkrete Definition vorhanden (siehe auch (Hornberg u. a. Januar 2020)); zur Beurteilung der Hochwertigkeit werden im KrWG vier Kriterien definiert: 1. die zu erwartenden Emissionen, 2. das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen, 3. die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie 4. die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen
Kalamitäten	Großflächiger Ausfall von Waldbeständen, hervorgerufen durch biotische (z.B. Borkenkäfer, Schwammspinner) oder abiotische (z.B. Sturm, Waldbrand, Schneebruch) Schäden
Klimarestaurierung	Die Klimarestaurierung umfasst das Ziel zur Wiederherstellung eines stabilen Klimazustands in Umkehrung des aktuellen Trends in der globalen Erderwärmung mit Maßnahmen die CO ₂ aus der Erdatmosphäre binden und Emissionen verringern.
Korngerüst	Massenanteile der unterschiedlichen Korngrößenklassen in einem Boden (nach DIN 17892-4-2017).
Kreislaufwirtschaft	Möglichst geschlossene Stoffkreisläufe um Abfälle zu Sekundärrohstoffe zu nutzen und so natürliche Ressourcen zu schonen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Lebenszyklusanalyse	Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (gemäß DIN 14040-2006).

Lehm	Verwitterungsprodukt natürlicher Gesteine, welches neben der für die Bindung wirksamen Tonfraktion schluffige und in der Regel auch sandige, kiesige bis steinige Bestandteile enthält (gemäß DIN 18942-1-2018).
Mineralische Ersatzbaustoffe	entstehen bei Baumaßnahmen als Bau- und Abbruchabfälle, sind unmittelbar oder nach Aufbereitung für den Einbau in technische Bauwerke geeignet und bestimmt, werden als Abfall oder Nebenprodukt in Aufbereitungsanlagen hergestellt (Ersatzbaustoffverordnung)
Nebenprodukt	Fällt ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist, ist er als Nebenprodukt und nicht als Abfall anzusehen (gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012).
Ökologische Melioration	Auch Bodenmelioration. Verbesserung des Zustandes von Böden, insbesondere auf produktionschwachen (z.B. sandigen) Standorten. Im Kontext der Agroforstwirtschaft und der damit verbundenen Beschattung und Durchwurzelung meint dies vor allem die Absenkung des Nährstoffaustrags, die Verbesserung der Wasserhaltekapazität und die Minimierung von Windverwehung.
Physisch gebundener Kohlenstoff	Massenanteil an Kohlenstoff (C) im Baumaterial
R-Beton, RC-Beton	Beton, bei dem gebrochener Naturstein oder auf natürliche Weise entstandener Kies durch eine rezyklierte Gesteinskörnung, d.h. aufbereiteten Bauschutt, teilweise oder ganz ersetzt wird (www.baunetzwissen.de)
Re-entaglement	Gesunde und regenerative Wiederverflechtung menschlichen Handelns mit den natürlichen Systemen dieser Erde
Regeneratives Bauen	keine offizielle Definition vorhanden; im vorliegenden Bericht wird unter diesem Begriff eine Bauwirtschaft verstanden, welche vorrangig auf der Nutzung von regenerativen (nachwachsenden) Rohstoffen als Baumaterialien basiert
Recycling	Aufbereitung von Abfällen zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke (Art. 3 Nr. 17 AbfRRL); umfasst nur stoffliche Verwertung
Silvoarable Systeme	Silvoarable Agroforstsysteme sind durch den gleichzeitigen Anbau von Gehölzen und annuellen landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Kulturen gekennzeichnet. (gemäß DeFAF, 2023)
Stoffströme	Gerichtete Bewegung von Stoffen und Stoffgemischen. Es gibt natürliche Stoffströme wie den Nährstoffkreislauf in Ökosystemen und vom Menschen induzierte oder veränderte Stoffströme wie Rohstoffströme und Abfallströme. (Gemäß Umweltbundesamt „Glossar zum Ressourcenschutz“, 2012).
Terrestische Kohlenstoffsinken	Terrestische Kohlenstoffsinken Bezeichnung von natürlichen und dynamischen CO ₂ - Reservoirs, die Bestandteil eines natürlichen Kohlenstoffkreislaufes sind. Die wichtigsten Kohlenstoffsinken sind Wälder und Ozeane.
UStatG	Umweltstatistikgesetz
Wiederverwendung	Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, werden wieder für denselben Zweck verwendet, für den sie ursprünglich bestimmt waren unter Nutzung ihrer Gestalt ohne bzw. mit beschränkter Veränderung des Produkts (Art. 3 Nr. 13 AbfRRL, VDI 2243)
Weiterverwendung	Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, werden weiter für einen anderen Zweck verwendet, als für den sie ursprünglich

**Verbaute CO₂-Emissionen
(embodied carbon)**

bestimmt waren unter Nutzung ihrer Gestalt ohne bzw. mit beschränkter Veränderung des Produkts (VDI 2243) CO₂-Emissionen, die während der Herstellung von Baumaterialien freigesetzt werden (cradle-to -gate) (Circular Eco-logy 2019) Können auch für cradle-to-site oder cradle-to-grave angegeben werden. Die im vorliegenden Bericht verwendeten ICE-Daten sind cradle-to-gate.

Verwertung

Abfälle werden einem sinnvollen Zweck zugeführt, indem sie andere Materialien ersetzen (Art. 3 Nr. 15 AbfRRL); um-fasst stoffliche und energetische Verwertung

Zirkuläres Bauen

keine offizielle Definition vorhanden; im vorliegenden Bericht wird unter diesem Begriff eine kreislaufgerechte ressourcenschonende Bauwirtschaft mit Fokus auf Wieder-/Weiterverwendung von Bauteilen und Bauprodukten (Vermeidung von Abfall) sowie hochwertigem Baustoffrecycling unter Sicherstellung von notwendigen Schadstoffsenken historischer Kontaminationen verstanden; dies umfasst sowohl wiederverwendungs- und recyclingfähiges Design als auch hohe Wiederverwendungs- und Recyclingquoten (Definition nach DGNB) beschränkt sich nicht auf die ausschließliche Nutzung von Materialien aus der und für die Bauwirtschaft, sondern ist in einer Gesamtkreislaufwirtschaft zu sehen, wo verschiedene Wirtschaftszweige durch kaskadische Materialnutzung im Austausch sind

1. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes war die Herausarbeitung von bestehenden Chancen und Hürden für ein „radikal regionales“, klima- und kreislaufgerechtes Bauen das vollständig auf regional verfügbare bio-basierte Materialien und Abfallprodukte zurückgreift. Anlässlich der Planung des konkreten experimentellen Bauvorhabens im Zentrum von Potsdam wurde die systemische Einbettung von dem Gebäude in den regionalen Kontext der Ressourcenregion Berlin-Brandenburg untersucht. Durch die Bildung eines transdisziplinären Konsortiums aus regionalen Forschungsinstitutionen und Praxispartner*innen, unter Leitung des Bauhaus Erde, wurden sowohl konkrete Handlungsableitungen für den zukünftigen Bau, als auch Erkenntnisse auf die bestehenden Rahmenbedingungen für ein klima- und kreislaufgerechtes Bauen innerhalb spezifischer Ressourcenregionen insgesamt erarbeitet.

Der vorliegende Abschlussbericht des Projekts umfasst im ersten Teil die Forschungsergebnisse zu Potentialen und bestehenden Hürden eines regionalen, klima- und kreislaufgerechten Bauens in Berlin-Brandenburg. Die Kooperationspartner*innen der Fachgebiete für Sozioökonomie & Kommunikation und Forstnutzung & Holzmarkt der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNEE) fertigten eine Potentialanalyse regional verfügbarer regenerativer Baumaterialien (**AP 1**) an. Hierbei wurde dringender Forschungsbedarf bezüglich der nachhaltigen Nutzung diverser, bisher ungenutzter Baumarten deutlich, die im Rahmen eines klimagerechten Waldumbaus von Plantagenwäldern zu Mischwäldern für den Bausektor an Bedeutung gewinnen werden. Gleichzeitig sollte die Holzbe- und verarbeitende Industrie in Brandenburg weiter zielgerichtet entwickelt werden, um regionale Wertschöpfungsketten, Produktionsprozesse und Kaskadennutzungen zu optimieren. Langfristig gesehen können vor allem Agroforst-Systeme Biomasse für die Bauweise liefern, den Nutzungsdruck auf Forstsysteme verringern und zu einer Vielfalt von Ko-Benefits in Bezug auf Wasserhaushalt und Biodiversität beitragen. Die Kooperationspartner*innen von dem Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie der TU Berlin, sowie dem Netzwerk Haus der Materialisierung im Haus der Statistik Berlin analysierten die Potentiale regional verfügbarer Sekundärrohstoffe und Chancen, Strukturen und Narrative der Kreislaufwirtschaft in Berlin-Brandenburg (**AP 2**). Es wurde deutlich, wie weit die Bauwirtschaft derzeit von der Vision des zirkulären Bauens entfernt ist. Insbesondere im Hochbau ist der Wiedereinsatz von Bauteilen und der Einsatz von recycelten Baustoffen gering. Neben materialinhärenten Eigenschaften, die die Recyclingfähigkeit und eine vollständige Kreislaufwirtschaft erschweren, bestehen derzeit weitere Hindernisse und Barrieren, wie zum Beispiel Qualitätsanforderungen oder Preiskonkurrenz. Zusammen mit dem „Haus der Materialisierung“ wurden fünf Beispiele untersucht, die anfallende Reststoffe durch Wieder- und Weiterverwendungsprozesse in prototypischen Anwendungen in Bauprodukte überführen. Die Kooperationspartner*innen von dem Fachgebiet Stadtökologie der TU Berlin untersuchten die CO₂-Emissionen, sowie den „gespeicherten“ CO₂-Gehalt verschiedener Materialien (**AP 3**). Dabei wurde deutlich, dass der Kohlenstoffgehalt von Bauteilen aus Laubholz 40% höher ist als von Nadelholz, und dass die Technologien bei der Herstellung von Bauteilen einen bisher zu wenig beachteten Einfluss auf den CO₂-Fussabdruck insgesamt haben.

Der zweite Teil des Abschlussberichtes umfasst die integrale Planung für die Errichtung des temporären Forschungspavillons „Proto Potsdam“, die erste Stufe des Bauvorhabens, durch die Kooperation von Bauhaus Erde, dem Natural Building Lab der TU Berlin und weiteren Praxispartner*innen sollen nachhaltige, regionale Baumaterialien und Konstruktionsweisen für eine spätere Anwendung im dauerhaften Bau getestet werden (**AP 4**). Der Fokus wurde hierbei einerseits auf die Verwendung diverser Holzarten gelegt, die in zukünftigen Mischwäldern perspektivisch zur Verfügung stehen. Der zweite Fokus richtete sich auf die Entwicklung gepresster Lehmsteine aus regional beschaffenem Aushubmaterial. Drittens sollen neue Praktiken des zirkulären Bauens integriert werden, unter anderem durch das Testen wiederverwendeter Materialien und Abfallprodukte. Neben der Planung des Forschungspavillon und dem Einreichen eines Bauantrages erarbeitete das Bauhaus Erde und die UTB Projektmanagement Berlin GmbH eine Machbarkeitsstudie für den dauerhaften Bau (zweite Stufe). Hierbei wurden (**AP 5**) Prozesssicherung und nachhaltige Baulandbeschaffung berücksichtigt, die Vorbereitung für ein Konzept für eine frühzeitige Nutzer*innenbeteiligung erstellt, und Planungsideen für langfristige Entwicklungen in einem Entwurfseminar des Master-Studiengang Architektur der TU Berlin (Natural Building Lab) gesammelt, um Empfehlungen für nächste Umsetzungsschritte abzuleiten.

2. Einleitung

Anliegen und Aufgabenverständnis

Die Art und Weise, wie die Menschheit die gebaute Umwelt und spezifisch die Städte plant und entwickelt, folgt auch heute noch einer fossil-industriellen Logik mit desaströsen ökologischen Auswirkungen und vielfältigen sozialen Verwerfungen. In Deutschland und weltweit trägt das Siedlungswesen insofern massiv zur Nachhaltigkeitskrise der Moderne bei. Sollten sich Konstruktion und Struktur von Gebäuden und Städten nicht rasch grundlegend ändern, kann die Erderwärmung nicht mehr auf deutlich unter zwei Grad begrenzt werden.

Die Städte des Anthropozäns wurden größtenteils mit anorganischen Baumaterialien wie Zement, Stahl und Glas gebaut – gewonnen auf Basis fossiler Energieträger und mit erheblichen Umweltauswirkungen. Die Nachfrage nach diesen Materialien und Prozessen wird auch künftig stark ansteigen, wie Urbanisierungsprognosen zeigen. Bis 2050 werden weitere 2,5 Milliarden Menschen in Städten leben und damit die Voraussetzung für einen erheblichen Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen schaffen. Hinzu kommen Milliarden von Menschen, die bereits heute in völlig inadäquaten Zuständen leben sowie ein immenser Bedarf an Nachrüstung fehlender Grundinfrastrukturen. Neben dem Bedarf an einem klimagerechten Umbau in den Industrieländern, ist ein Großteil des Städtewachstums bzw. Umbau- und Nachrüstungsbedarfs (*retrofitting*) im globalen Süden, vor allem in Asien und in Subsahara-Afrika [UNDESA2018] zu erwarten. Zugleich werden die Wälder aufgrund der stetigen Umwandlung von Waldflächen für die landwirtschaftliche Produktion, den Abbau von Mineralien oder die Entwicklung von Vorstädten und infolge des Klimawandels zunehmend als kritische *terrestrische Kohlenstoffsinken* geschwächt.

Die gebaute Umwelt ist bereits heute über den gesamten Lebenszyklus betrachtet für 40 Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich [IEA & UNEP2019]. Die dramatische Zunahme der Bautätigkeit, die erforderlich ist, um das prognostizierte städtische Bevölkerungswachstum zu bedienen, wird mehr als drei Viertel des CO₂-Budgets für das 1,5-Grad-Ziel verschlingen [WBGU2016]. Im Zeitalter der Ressourcenknappheit und des Klimanotstands ist klar, dass Herstellung und der Betrieb neuer Gebäude und Infrastrukturen, aber auch die Ertüchtigung des Gebäudebestandes nach konventionellen Verfahren die Herausforderungen der Klimainstabilität eher verschärfen als lösen werden.

Effektive Lösungen zur Bewältigung des Klimawandels müssen folglich den Bausektor als einen zentralen Hebel berücksichtigen. Das Ersetzen kohlenstoffintensiver Baustoffe (z.B. Zement) durch biobasierte Materialien (z.B. Holz) kann nicht nur Treibhausgasemissionen verringern, sondern auch das aus der Atmosphäre entzogene Kohlenstoffdioxid (CO₂) speichern, was eine wesentliche Voraussetzung für die Begrenzung der globalen Erderwärmung auf unter 2-Grad darstellt. Die Forschung zeigt, dass Gebäude und Städte, die mit biobasierten und nachhaltig gewonnenen Baumaterialien gebaut und instandgehalten werden, in menschengemachte Kohlenstoffsinken verwandelt werden können. Um die Klima- und Biodiversitätskrise jedoch aus einer integrierten Perspektive zu adressieren und würdige Lebensbedingungen für alle Spezies zu sichern, muss die Transformation des Bausektors mit einem systematischen Umdenken und einer Umgestaltung unserer Städte und ihrer regionalen Einbettung sowie der Stabilisierung und dem Ausbau natürlicher Kohlenstoffsinken wie (städtischer) Wälder oder Grünflächen einhergehen.

Als neuer Denkraum für die Berücksichtigung der Einbettung von Städten und Siedlungen in die sie umgebenden natürlichen Systeme und Landschaften gewinnt das Konzept der „Ressourcenregion“ an Bedeutung - ein Raum mit spezifischen (und begrenzten) materiell-stofflichen, natürlichen, sozialen und kulturellen Grundgegebenheiten, der somit Systemgrenzen für ein klima- und kreislaufgerechtes Bauen definiert. Nur durch die konsequente Beachtung dieser Systemgrenzen im Sinne "radikaler Regionalität" im Bauen können Stoffströme und Wertschöpfungsketten auf die tatsächlich verfügbaren Ressourcen neu ausgerichtet, und zirkulär und geschlossen neu gedacht werden. Die Grenze einer "Ressourcenregion" wird hierbei weniger durch einen fest definierten geografischen Radius definiert, als

vielmehr durch sinnvolle, wirtschaftlich und ökologisch rechtfertigbare Stoffströme. Je nach Material kann geografische Distanz somit stark variieren und wird von Faktoren wie Gewicht und Größe der Materialien, Transportinfrastruktur, allgemeiner Verfügbarkeit und Kosten der Materialien sowie bestehenden Möglichkeiten zur Umleitung aus dem Abfallstrom beeinflusst.

Ziel ist die Transformation zu einer „regenerativen gebauten Umwelt“, welche zur Klimarestaurierung beitragen und sich positiv auf Mensch und Natur auswirken. Drei Grundprinzipien sind hierfür für Bauhaus Erde leitend: (1) die Anwendung regional verfügbarer biobasierter Baumaterialien und zirkulärer Baupraktiken beim Neubau und Sanieren von Gebäuden und Infrastrukturen zur Reduktion und Speicherung von Treibhausgasemissionen, insbesondere CO₂, (2) die nachhaltige Nutzung der für diese Aktivität bereitzustellenden biobasierten Ressourcen in Kombination mit der Regenerierung von urbanen und regionalen Landschaften (z.B. durch Aufforstung, Investitionen in grüne Infrastruktur) zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre, sowie (3) die Anwendung und Entwicklung integrierter Stadt- und Raumplanungsinstrumente zur Stärkung einer sozialgerechten, klimaangepassten, lebenswerten und ressourcenschonenden Stadt- und Infrastrukturentwicklung.

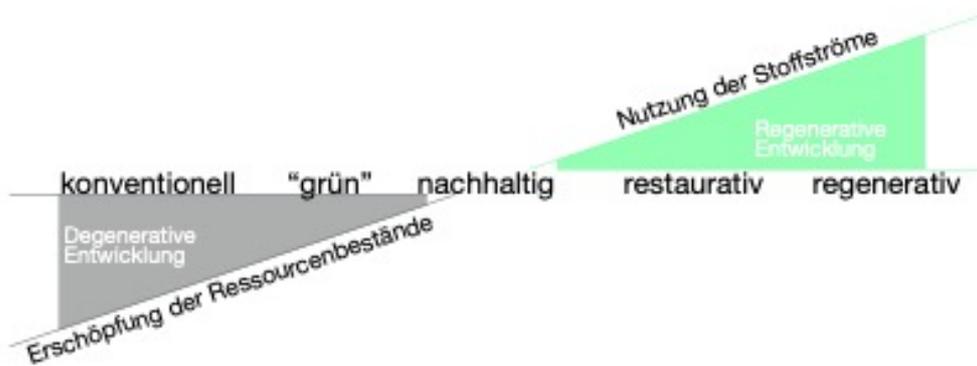


Abbildung 1: Regeneratives Design, Gäth, Kretschmann, 2023

Projektziele

Durch das Zusammendenken eines konkreten experimentellen Bauvorhabens „Epizentrum Bauwende“ - zweistufiges Bauprojekt im Zentrum von Potsdam – mit den oben beschriebenen Konzept einer „Ressourcenregion“ zu verbinden. Ziel ist die Herausarbeitung von bestehenden Chancen und Hürden für ein „radikal regionales“, klima- und kreislaufgerechtes Bauen das vollständig auf regional verfügbare biobasierte Materialien und Abfallprodukte zurückgreift. Durch die Bildung eines transdisziplinären Konsortiums werden sowohl konkrete Ableitungen für den zukünftigen Bau erarbeitet, aber zu gleich auch grundlegendere und somit übertragbare Erkenntnisse (Wissenslücken, regulative Hürden, politischer Handlungsbedarf) auf andere Bauvorhaben in der Region abgeleitet.

Das Projekt **Epizentrum Bauwende** ist aufgebaut in drei Teile, die sich gegenseitig bedingen: die Grundlagenforschung, die integrale Planung eines zweistufigen Demonstrationsbaus und die Projektkoordination und -kommunikation. Im Hauptteil dieses Berichts werden die Aufgabepakete und deren Ergebnisse der einzelnen Teile erläutert.

Die Grundlagenforschung ist untergliedert in folgende Aspekte, die in Kooperation mit unterschiedlichen und interdisziplinären Projektpartner*innen umgesetzt werden:

- i. AP1 – Potenzialanalyse regional verfügbarer regenerativer Baumaterialien
Leitung: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) – Prof. Dr. Martin Welp (Fachgebiete Sozioökonomie & Kommunikation) in Kooperation mit Prof. Dr. Tobias Cremer (Fachgebiete Forstnutzung und Holzmarkt) und in Kooperation mit der TU Berlin (Fachgebiet Habitat Unit, Projekt bb2040).
- ii. AP2 – Stoffstromanalyse und regionale Wertschöpfungsketten



Leitung: TU Berlin – Prof. Dr. Vera Susanne Rotter (Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie) in Kooperation mit ZUSAMMENKUNFT Berlin/ Netzwerk Haus der Materialisierung im Haus der Statistik Berlin

iii. AP 3 – CO₂-Lebenszyklus

Leitung: TU Berlin – Prof. Dr. Galina Churkina (Fachgebiet Stadtökologie)

Die integrale Planung setzt sich zusammen aus:

- i. AP 4 – Life Cycle Design/Lebenszyklusdesign (Entwurf Forschungspavillon)
- ii. Leitung: Bauhaus Erde in Kooperation mit TU Berlin (Prof. Eike Roswag-Klinge, Natural Building Lab), ZRS Architekten Ingenieure Berlin
Mit einer assoziierten Masterarbeit von Christian Gäth und Micha Kretschmann, TU Berlin (Prof. Eike Roswag-Klinge, Natural Building Lab)
- iii. AP 5 – Green Procurement/ Grüne Beschaffung (Machbarkeitsstudie Demonstrationsbau)
Leitung: Bauhaus Erde; in Kooperation mit UTB Projektmanagement Berlin GmbH

Die Projektkoordination und -kommunikation beinhaltet folgende Aufgaben:

- i. AP 6 – Gesamtkoordination, Partner*innennetzwerk und Dissememination
Leitung: Bauhaus Erde

Integrale Planung

In dem Demonstrationsprojekt werden die Planungsaufgaben eng verzahnt mit der parallel dazu stattfindenden Forschung. Die integrale Planung besteht aus:

- a.) Arbeitspaket 4: der konzeptionellen Vorbereitung und begleitenden Forschung (während der ersten Planungsphasen bis Erstellung eines Bauantrages) für einen **temporären Forschungspavillon Proto Potsdam in Potsdam**. Der Forschungspavillon dient zum Testen von regional verfügbaren biobasierten Materialien, Potenzialen der Maximierung von CO₂ Speicherung in Gebäudeteilen und kreislaufgerechten Entwurfsansätzen inklusive Recyclingstrategien für Bauteile.
- b.) Arbeitspaket 5: Begleitforschung zur Erstellung einer **Machbarkeitsstudie und Schaffung von Planungsvoraussetzungen** für einen **dauerhaften Demonstrationsbau** zur Behausung von Kernfunktionen des Bauhaus Erde im Zentrum von Potsdam, insbesondere integrale Entwicklung grundlegender Ansätze für das Nutzungskonzept sowie Prozessklärung hinsichtlich Ausschreibung und Beschaffung.

In einem iterativen Planungsprozess fließen die Erkenntnisse aus der Forschung direkt als Entscheidungskriterien in die Planung ein, und die jeweils vorangegangenen Planungsschritte wurden entsprechend überprüft und ggf. im weiteren Verlauf neu gefasst. Aus dem Planungsprozess heraus ergeben sich konkrete Forschungsfragen, insbesondere hinsichtlich genehmigungsrechtlicher und formaler Rahmenbedingungen. Für auftretende Hemmnisse gegenüber Anforderungen des klimagerechten Bauens werden modellhaft Lösungswege aufgezeigt und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Der nachhaltige integrale Planungsprozess ist bereits Teil der zu demonstrierenden Bauwende. Dazu gehört unter anderem auch die frühzeitige Berücksichtigung von sozialräumlichen Nachhaltigkeitsprinzipien im Sinne der Herstellung einer robusten Nachbarschaft, welche in dieser frühen Phase für den langfristigen Bau vorbereitet wird.

3. Hauptteil

3.1 Potentialanalyse regional verfügbarer regenerativer Baumaterialien (AP 1)

*Autor*innen Kapitel 3.1: Dr. Ferréol Berendt, Dr. Johannes Litschel, Prof. Dr. Martin Welp, Prof. Dr. Tobias Cremer (alle Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde)*

Die Transformation der gebauten Umwelt mittels regenerativer Baustoffe wie Holz, Hanf, Lehm oder Stroh hängt eng mit einer nachhaltigen land- und forstwirtschaftlichen Ressourcennutzung zusammen. Dabei gewinnen nachwachsende Rohstoffe durch die steigende Nachfrage nach Rohstoffen, den Klimawandel und sich ändernden gesellschaftlichen Anforderungen zunehmend an Bedeutung. In diesem Kontext rücken insbesondere die 11,4 Millionen Hektar Waldfläche in Deutschland mit ihren vielfältigen Ökosystemleistungen für Gesellschaft und Umwelt immer stärker in den Fokus [BMEL2021]. Wichtige Ökosystemleistungen des Waldes in Deutschland sind z. B. die Speicherung von CO₂ (2,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff sind in den Wäldern gebunden), die Erholungsfunktion (2,3 Milliarden Waldbesuche pro Jahr), die Bereitstellung von Trinkwasser (40 Prozent der Fläche aller Wasserschutzgebiete liegen im Wald) oder die Erzeugung des nachwachsenden Rohstoffs Holz (jährlich rund 73 Millionen m³). Neben der Gewinnung von Holz aus der Forstwirtschaft steigt hierzulande das Interesse an der Förderung von Biomasse aus Agroforstwirtschaft. In Europa sind silvoarable Systeme am weitesten verbreitet (Herder u. a. 2017). Sie liefern neben Agrarprodukten (z. B. Getreide und Faserpflanzen) auch Holz. Dennoch ist die Bedeutung von Agroforstsystemen mit einem Flächenanteil von 1,6 % an der landwirtschaftlichen Gesamtfläche Deutschlands noch relativ gering [Her2017]. Bisher werden 16,6 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutzte Fläche zu 60 % für die Erzeugung von Futtermittel, zu 22 % für Nahrungsmittel, zu 14 % für Energiepflanzen, zu 2 % als Brache oder Stilllegung und weitere 2 % für Industriepflanzen genutzt [FNR2020]. Industriepflanzen dienen als Rohstoffquelle für die stoffliche Nutzung für die Herstellung von biobasierten Kunststoffen, Wasch- und Reinigungsmitteln, Farben, Medikamenten, Papier und Baumaterialien. Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zur Gewinnung von Baumaterialien ist insbesondere im Hinblick auf die Speicherung von Kohlenstoff sowie deren Substitutionsleistung sehr attraktiv [BMEL2021]. Dabei sollte die Nutzung von regionalen und lokalen Rohstoffen priorisiert und gefördert werden, da z. B. allein der Holztransport 77 % der Emissionen (CO₂-äq.) der Holzbereitstellungskette verursacht [Küh2022].

Die Produktion von biotischen Rohstoffen erfolgt sowohl im Rahmen der Landwirtschaft wie auch im Rahmen der Waldwirtschaft. Die Verwendung dieser Rohstoffe dient zu 97 % Ernährungszwecken (Nahrungs- und Futtermittelbereich) und zu 3 % der industriellen Nutzung [Nic2001]. Letztere wird durch die Autorinnen in vier Kategorien unterteilt: 1) Chemieindustrie, 2) Bau-, Möbel-, und Papierindustrie, 3) Textil- und Automobilbranche und 4) Energiesektor. Für die technische Verwendung im Bausektor überwiegt die Nutzung von Holz. Dennoch gewinnen auch Erzeugnisse aus der Landwirtschaft, wie z. B. Dämmstoffe aus Faserpflanzen, zunehmend an Bedeutung im Baubereich. Absolut gesehen ist die regionale Verfügbarkeit zurzeit dennoch gering, mit nur niedrigen Marktanteilen der stofflichen Nutzung der einzelnen Pflanzen und einem entsprechend hohen Preisniveau und geringen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes die regionale Verfügbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen mit potenzieller Eignung zur Herstellung von regenerativen Baumaterialien bzw. -produkten untersucht. Dabei lag der Fokus auf erneuerbaren Rohstoffen, die in der Region Berlin-Brandenburg aus Wald-, Agrar- und Agroforstsystemen gewonnen werden können.

3.1.1. Wald- und Holzwirtschaft

Teil 1 des APs 1 untersuchte neben einer Bestandsaufnahme der aktuellen Situation die Ressourcenpotenziale in quantitativer Hinsicht. Die Beschreibung der Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe in der Region Berlin-Brandenburg erfolgte mittels einer Literaturanalyse für die Wald- und Holzwirtschaft sowie für die Biomassegewinnung aus der Landwirtschaft.

3.1.1.1 Forst- und holzwirtschaftliche Situation und Perspektiven

Bestockung und Waldumbau

In Berlin-Brandenburg beträgt die Waldfläche 1,1 Mio. Hektar und somit 37 % der Landfläche [BMEL 2018]. Der brandenburgische Wald ist kieferndominiert und von gleichaltrigen Reinbeständen geprägt. (ca. 70 %, [BWI³], a. Abb. 1). Die weiteren Anteile in den Wäldern Brandenburgs sind Laubbäume niedriger Lebensdauer (z. B. Birken- und Pappelarten) mit ca. 12 %, Eichen mit ca. 7 % und Buchen mit ca. 3 % [BWI³ und MLUL2015]. Die Bestände sind überwiegend mittelalt (zwischen 41-60 Jahre). Etwa 65 % der Kiefern sind unter 80 Jahre alt [BWI³ und MLUL2015].

Aufgrund damit verbundener ökonomischer und ökologischer Risiken kommt dem Waldumbau in Brandenburg eine besondere Rolle zu. Zwischen 2012 und 2021 wurden insgesamt knapp 19.000 Hektar Wald umgebaut, mit dem Ziel durch eine naturnahe Baumartenmischung das Risiko von Kalamitäten zu verringern [MLUK2021]. Dabei werden überwiegend Mischwälder aus Laub- und Nadelbäumen mit ausschließlich standortgerechten Baumarten gefördert [BMEL2016]. Im Zuge des Waldumbaus erhöht sich der Laubholzanteil stetig und macht sich insbesondere in der jüngsten Altersklasse bemerkbar. So sind in dieser Altersklasse (1-20 Jahre) bereits 54 % der Fläche mit Laubbäumen bestockt [MLUL2015]. Seitens Politik und Wissenschaft wird betont, dass der Waldumbau durch gezielte Fördermaßnahmen weiter beschleunigt werden soll.

Die zukünftigen Bestände sollen die ökologische, ökonomische und soziale Funktion des Waldes gleichermaßen berücksichtigen. Die integrative, multifunktionale Waldbewirtschaftung zielt dabei auf eine ganzheitliche Betrachtung und Vereinigung der vielfältigen Ökosystemleistungen des Waldes auf der gleichen Fläche ab.

Für einen schnellen Waldumbau sind insbesondere die hohen Wildbestände und die Waldbesitzverhältnisse mit einem hohen Anteil an Klein- und Kleinstprivatwaldbesitzer*innen große Herausforderungen. In Brandenburg gehören 61 % (im deutschen Durchschnitt 48 %) der gesamten Waldfläche ca. 100.000 privaten Waldeigentümern. Dadurch sind viele Privatwälder sehr klein, was zu Bewirtschaftungsnighteilen aufgrund von geringer Flächengröße, Besitzsplitterung oder ungünstigen Flächenformen führen kann. Neben den Möglichkeiten der Privatwaldförderung für z. B. klimaangepasstes Waldmanagement oder forstwirtschaftliche Infrastruktur, fördert das Land Brandenburg den Zusammenschluss von Forstbetrieben, mit dem Ziel, die Privatwaldbewirtschaftung durch potenzielle Umsatzsteigerung und bessere Holzvermarktungsmöglichkeiten zu verbessern [MLUL2015].

Beim brandenburgischen Waldumbau von Kiefernreinbeständen zu Mischbeständen werden künftig eine höhere Vielfalt an Nadel- und Laubbaumarten eine Rolle spielen, darunter:

- Kiefer: Die gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris*, L.) weist eine hohe Frostresistenz auf und gedeiht auch bei niedrigen Niederschlagsmengen von 400 mm/Jahr und auf nährstoffarmen Standorten [Hij2005]. Die Pionierbaumart mit hohen Lichtansprüchen [MLU2016] hat einen durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 9,5 Vfm je Jahr und Hektar [BWI³]. Aufgrund des Klimawandels und ihrer Anfälligkeit gegenüber Pilzen, Insekten und Windwurf sowie relativ geringer Konkurrenzfähigkeit werden die Anteile von Kiefern durch Waldumbauprogramme in der Region Brandenburg-Berlin sukzessive abnehmen.
- Buche: Die Buche (*Fagus sylvatica*, L.) ist die Hauptbaumart der potenziell natürlichen Vegetation (pnV) Deutschlands. In Brandenburg finden sich Buchenbestände auf 34.600 Hektar und somit auf 3,3 % der Brandenburgischen Waldfläche (insb. im Norden Brandenburgs) [MLUL2015]. Die Buche galt bislang als besonders anpassungsfähig an akute Stressfaktoren und latente Umweltveränderungen. Jedoch wirkt sich die isohydrische Anpassungsstrategie der Buche bei langanhaltenden und wiederkehrenden Trockenphasen nachteilig aus [MLUK2021]. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass auch zukünftig Buchenreinbestände nur kleinere Flächen einnehmen werden. Die Buchenanteile könnten jedoch zunehmen, insbesondere in Buchenmischwäldern mit Beimischung von trockenheitstoleranteren Laubbaumarten wie zum Beispiel Sommer-Linde, Elsbeere, Feld-Ahorn, Flatter-Ulme und Stiel-Eiche.
- Eichen: Die Stiel- und Trauben-Eichen (*Quercus robur*, L. bzw. *petraea*, LIEBL.) kommen im Bundesland Brandenburg auf einer Fläche von ca. 57.000 Hektar vor und erreichen damit etwa 5 % der

Bestockung aller Baumarten. Besondere Bedeutung haben sie als Mischbaumarten (Unterstand) im Rahmen des Bestockungswechsels von Kiefernreinbeständen in strukturreichere Nadel-Laub Mischwälder. Somit wird von einer Zunahme von Stiel- und Traubeneichen ausgegangen. Zusätzlich könnte im Zuge des Klimawandels die Anbaufähigkeit wärmeliebender Flaum- und Zerreichen im norddeutschen Tiefland zunehmen [Kät2012].

- Robinie: Die gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*, L.) stammt aus dem östlichen Nordamerika und wird in Europa aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit, schnellen Wachstums, hohen Reproduktionspotenzials, wertvollen und harten Holzes und Werts als Zier- und Bienenstrachtbaum seit über 340 Jahren in Europa und Brandenburg angebaut [Sto2009; MLUK2020; Eng2020]. Als hitze- und trockenolerante, schnellwachsende Pionierbaumart kann die Robinie auch bei geringen Jahresniederschlägen unter 400 mm gedeihen. In Brandenburg wird Robinie auch in (Kurzumtriebs-) Plantagen angebaut, da sie auch auf humusarmen und sauren Böden wächst. Somit eignet sie sich auch für Agroforstflächen und auf Bergbaufolgelandschaften [Grü2007, Qui2012; Eng2020]. Dennoch ist der Anbau von Robinie – im Wald, auf Agrarflächen und auf Bergbaufolgelandschaften – wegen ihres Invasivitätspotenzials umstritten [Mey2015].

Aktuelle und zukünftige Holznutzung:

Die Bewirtschaftung der Kiefern-Bestockung in gleichaltrigen Kiefern-Reinbeständen zielt auf eine Pflege in den verschiedenen natürlichen Altersstufen: Jungwuchs, Dichtung, Läuterung, Jungdurchforstung, Altdurchforstung, Zielstärken- bzw. Endnutzung [MLU2016]. Die Zielstärken- bzw. Endnutzung erfolgt i.d.R. mit einer Umtriebszeit von 100-140 Jahren. In leistungsfähigen Beständen können Zielstärkennutzungen schon ab einem Alter von 80 Jahren beginnen [MLU2016]. Durch die aktuelle Baumarten- und Altersklassenverteilung des Waldes in Brandenburg werden in den nächsten 30-50 Jahren weiterhin viele Kiefern ihre Zieldurchmesser erreichen, wodurch – ohne Berücksichtigung möglicher früherer Kalamitätsnutzungen – mit der Endnutzung der Bestände begonnen werden kann. Die wichtigsten Verkaufssortimente sind neben Sägeholzabschnitten (z. B. Stammholz, Langholzabschnitte, Palettenholz) vorwiegend Industrie- und Energieholz (Rohholz, das z. B. mechanisch oder chemisch aufgeschlossen wird). In den letzten Jahren wurde im Landesbetrieb Forst Brandenburg mehr Industrieholz als Sägeabschnitte eingeschlagen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gesamteinschlag im Landesbetrieb Forst Brandenburg nach Verkaufssortimenten und Jahren

Sortiment / Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesamteinschlag (in Mio. Efm)	1,1	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	1,0
Sägeholzabschnitte (in %)	39	42	44	44	41	38	45
Industrie-/Energieholz (in %)	52	51	50	51	56	56	51
Sonstiges Holz (in %)	9	7	6	5	3	6	4

Zusätzlich zum Einschlag im Landeswald wurden 2021 in Brandenburg 2,232 Mio. Efm im Privatwald, 315.000 Efm im Körperschaftswald und 108.000 Efm im Bundeswald eingeschlagen. Der Schadholzanteil am gesamten Holzeinschlag ist zwischen 2020 und 2021 von 36 % auf 26 % gesunken [MLUK2021]. Der Anteil von Nadelholz am Gesamteinschlag überwiegt sowohl in Deutschland als auch in Brandenburg. In Brandenburg liegt der Anteil von Nadelholz am Gesamteinschlag im Durchschnitt der Jahre 2015-2021 bei 89 % (Abbildung 2).



Quelle: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg
Abbildung 2: Entwicklung des Holzeinschlags in Brandenburg seit 2007 nach Holzartengruppen
Quelle: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2021

In Projektionen im Rahmen der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung, die auf die Ergebnisse der BWI³ aufbauen, bleiben der Vorrat und das Nutzungspotenzial der Baumartengruppe Kiefer bis zum Jahr 2052 nahezu konstant (Abbildung 3). Dabei verändern sich jedoch die Anteile von Holz aus Jungdurchforstung, Altdurchforstung und Endnutzung mit einer Verschiebung der geernteten Durchmesser-Klassen.

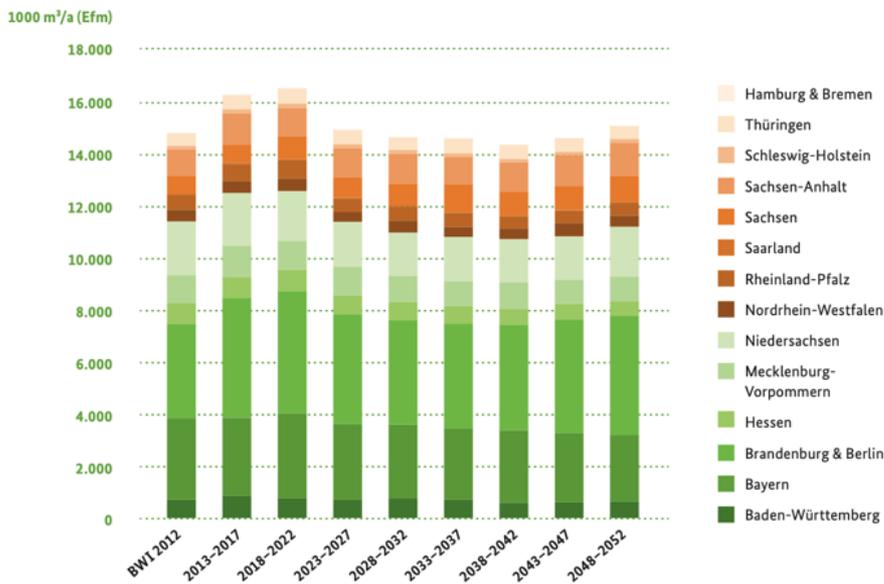


Abbildung 3: BWI-Nutzung und Potenzial der Holzartengruppe Kiefer nach Land und Periode
Quelle: BMEL 2016

Folgen und Ausblick

Analog zu den Nadelholzanteilen wird die Holzernntemenge des Landeswaldes Brandenburg insgesamt aufgrund der sich verändernden Bestandsstruktur in den künftigen Jahren zurückgehen [MIL2011]. Dies könnte aufgrund der steigenden Nutzung von Holzrohstoffen – mit einer jährlichen Zuwachsrate von +3,7 % zwischen 1990 und 2016 [Man2018] - zu einer verstärkten regionalen Holzrohstoffknappheit führen. Zudem ist unbedingt zu beachten, dass die genannten Projektionen und Hochrechnungen der letzten Jahre stellenweise nur noch sehr bedingt Aussagekraft besitzen – zu hoch war in den letzten Jahren, seit dem extremen Trockenjahr 2018 in ganz Deutschland der Anteil an unregelmäßigen Kalamitätsnutzungen am jährlichen Holzeinschlag, insbesondere aufgrund von Borkenkäfer, Sturm und Waldbränden. Hier werden erst die Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI⁴) in 2024 aktuellere, belastbarere Ergebnisse zu Zuwächsen, Potenzialen und Nutzungsmöglichkeiten für die nächsten Jahre liefern können. Grundsätzlich ist aber zu sagen, dass sich aktuell zeigt, dass der durchschnittliche jährliche Temperaturanstieg deutlich schneller voranschreitet als in den letzten Jahren prognostiziert, mit bislang unvorhersehbaren, mutmaßlich schweren Konsequenzen für die deutschen Wälder. Den Wäldern geht im wahrsten Sinne des Wortes das Wasser aus (Winterkolloquium 2023 in Freiburg).

Potenzial von Kiefernrinde als innovativer regenerativer Rohstoff

Aufgrund des beschriebenen hohen Kiefernanteils an brandenburgischen Wäldern lohnt eine gesonderte Betrachtung der Baumrinde unter dem Gesichtspunkt der Rohstoffgewinnung. Bei Kiefer kann der Anteil von Borke bis zu 25 % des Stammvolumens betragen, bei der Spiegelrinde ist der Anteil geringer [Ber2021 und 2023]. Die aktuelle Wertschöpfung der Rinde ist trotz dieses hohen Vorkommens sehr gering: meistens wird Rinde als Nebenprodukt der Holzindustrie energetisch verwertet oder in geringerem Umfang zu Rindenmulch verarbeitet. Die Rohstoffeffizienz von Rinde könnte jedoch deutlich erhöht werden wie z. B. als bindemittelfreie Rindenplatten [Wen2023]. Mittels eines eigens für die Bestimmung der Rohstoffpotenziale bei Kiefernrinde entwickelten Modells (s. dazu [Ber2023]) konnten diese für Brandenburg quantifiziert werden:

Durchschnittliche Rindenanteile zugrunde gelegt, fallen für 100 m³ Kiefernindustrieholz ca. 11 m³ Rinde am Werk an. In 2021 wurden ca. 1,5 Mio. Fm brandenburgisches Kiefernholz an die Holzwerkstoffindustrie (Industrie-/Energieholz) geliefert. Dies entspricht einem Rindenvolumen von 125 Tsd. m³, das für eine stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen würde. Eine genauere Kiefernrinde-Potenzialanalyse sollte noch das Stammholz (Sägeindustrie) untersuchen. Durch die dicke Borke der Kiefer am unteren Baumdrittel [Wil2021] ist von einer deutlich höheren Menge Rinde bei Sägewerkssortimenten auszugehen. Hinderlich ist, dass der Holzindustriesektor in Brandenburg mengenmäßig derzeit noch stärker auf Holzwerkstoffe und weniger auf Sägesortimente spezialisiert ist.

Holzindustrie

Die Holzindustrie wird meist in drei Kategorien unterteilt: i) Sägeindustrie, ii) Holzwerkstoffindustrie und iii) Zellstoff- und Papierindustrie. Dabei ist ein Süd-Südwest zu Nord-Nordost-Gefälle in der Holzindustrielandschaft Deutschlands deutlich. Im Süden und im Westen sind die Anteile der Holzverwendung in der Sägeindustrie deutlich höher als im Nordosten, d.h. der größere Teil der Einschnittkapazität ist im Süden und Westen Deutschlands zu finden. Das in Deutschland gewonnene Waldderholz wird zu 54 % in der Sägeindustrie, zu 11 % von der Holzwerkstoffindustrie und zu 9 % von der Zellstoff- und Papierindustrie verwendet. Der Anteil für die energetische Nutzung von Waldderholz liegt bei ca. 26 %, wobei davon allein 90 % durch private Haushalte energetisch verwertet werden. Kiefernstammholz wird vor allem im Baubereich und – sofern es von guter Qualität ist – u. a. im Fenster- und Möbelbau eingesetzt. Kiefernholz von geringerer Güte findet Absatz in der Holzwerkstoffindustrie und z. T. in der Zellstoffindustrie [BMEL2016]. Bei Laubholz erfolgt die wichtigste Wertschöpfung meist durch energetische Nutzung, da nur geringe Mengen in die stoffliche Nutzung (z. B. Schnittholz, Furnier, Sperrholz) gehen [Man2018].

In Brandenburg sind vor allem die zwei großen Holzindustrie-Cluster in Heiligengrabe und in Baruth zu nennen, mit hohen OSB- und MDF-Produktionskapazitäten. Zudem befindet sich ein großes Werk der Holzwerkstoffindustrie (MDF- und Spanplatte) in Beeskow. Diese Produkte basieren nahezu ausschließlich (OSB) oder vorwiegend (MDF) auf Nadelholz. Die Sägewerkslandschaft in Brandenburg ist - bis auf ein großes Laubholzsägewerk in Templin - auf Nadelholz und insbesondere auf die Kiefer fokussiert. Die wichtigsten Standorte für die Sägeindustrie in Brandenburg sind folgende: Templin (Laubholz), Baruth/Mark, Milnersdorf und das Boitzenburger Land. Somit lässt sich festhalten, dass eine Weiterentwicklung des Holzindustriesektors in der Region Brandenburg-Berlin wichtig wäre, um a) mehr Kiefernholz in eine höhere Wertschöpfung (insb. Bauholz) und somit in eine langfristige, kohlenstoffbindende Nutzung zu verarbeiten, b) sich an die zukünftigen Baumarten und deren Sortimente anzupassen, c) neue innovative Produkte aus wenig genutzten Baumrohstoffen wie z. B. Rinde zu entwickeln und vermarkten und d) eine Kaskaden- bzw. Mehrfachnutzung mitdenken.

3.1.2 Biomasse aus der Landwirtschaft: Bestandsaufnahme und Potenziale ausgewählter Faserpflanzen

Der zweite Teil von AP1 arbeitete die Potenziale von bestimmten Faserpflanzen heraus, deren Vorkommen in Brandenburg gesichert ist, und die im Hinblick auf Ökologie, Verfügbarkeit und Materialeigenschaften auf ihre Nutzbarkeit als Baustoff geprüft wurden.

Hanf (*Cannabis sativa*, *Cannabis sativa* var. *sativa*):

Bei Hanf handelt es sich um eine der stabilsten Naturfasern [Rol2017]. Zur Gewinnung von Hanf sind wasser- und nährstoffreiche, tiefgründige und mittelschwere Böden von Vorteil [Dom2023]. Unter idealen Bedingungen können in Deutschland jährlich 5,5 bis 8 Tonnen Hanffasern pro Hektar gewonnen werden [Mir2020]. Trotz eines hohen Wasserbedarfs weist Hanf im Vergleich zu anderen Faserpflanzen eine relative hohe Wasserproduktivität (der Beziehung zwischen dem Wasserbedarf und dem Aufbau von Trockenmasse) auf, weswegen sein Anbau auch in trockeneren Gegenden möglich ist [Rol2017]. An die klimatischen Bedingungen Brandenburgs und Berlins angepasste, frühreife Sorten versprechen dabei vergleichsweise hohe Ernteerträge [Dom2023]. Laut *Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung* (BLE) nimmt die Anbaufläche und die Anzahl der Hanf anbauenden Betriebe in Deutschland stetig zu [BLE2021]. Auch für Berlin und Brandenburg scheint es eine wachsende Nachfrage nach regional hergestellten Hanfprodukten zu geben. 2021 wurden hier auf 467 Hektar Anbaufläche 7,2 % des in Deutschland produzierten Hanfs gewonnen [BMEL 04.05.2023]. Waren es 2021 noch 25 Agrarbetriebe, so stieg diese Zahl im Jahr 2022 bereits auf 35 [BMEL 04.05.2023]. Diesen Agrarbetrieben stehen mit *Hanffaser Uckermark eG* und *Hanfalk Berlin* zwei weiterverarbeitende Betriebe gegenüber, die zunehmend neue Wertschöpfungsketten erschließen [Innovatives Brandenburg 2022]. So gibt es für Hanf inzwischen eine breite Produktpalette, wobei grundsätzlich zwischen Faser- und Schäbenproduktlinien unterschieden wird. Hanffasern werden zur Gewinnung von Dämmstoffen für Dach, Fassade, Wand und Fußboden genutzt [Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2022; Sut2011]. In Kombination mit Naturkalk lassen sich aus Hanfschäben u.a. Ziegel herstellen (Ebd.). Dass es bisher nur zwei Erstverarbeitungsanlagen für Hanf in Berlin und Brandenburg gibt, liegt an einem hohen, kostenintensiven Spezialisierungsgrad der notwendigen Gerätschaften und Maschinen [Gus2016]. Fehlende Strukturen zur Verarbeitung der Pflanzen in räumlicher Nähe zu Hanfanbaugebieten hindern das Wachstum des Marktes nicht nur hier, sondern in ganz Deutschland [Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2022]. Trotzdem besteht bei Vertreter*innen der Industrie die Hoffnung, dass sich die Kostennachteile durch Innovationen in der Produktion und Distribution von Erzeugnissen in den nächsten Jahren verringern werden [Bundesvereinigung Nachhaltigkeit e.V 2021].

Lein (*Linum usitatissimum*):

Lein stellt keine hohen Ansprüche an die Bodenbeschaffenheit. Mit Keimtemperaturen von 2 bis 3°C und einer Frosttoleranz von -3 bis -5°C ist der Anbau auch in nördlichen Gefilden möglich [Fre]. Optimale Fasererträge können dennoch nur bei gleichmäßigem Niederschlag von 120-130 mm während der Vegetationsperiode erzielt werden [Röh1998]. Auch sind reine Sand- und Tonböden wie sie in Brandenburg vorkommen nicht geeignet [Sch2002]. Lein wird als Baustoff zu Flachs, Öl-, Langfaser- und Kurzfasellein sowie Schäben verarbeitet [Sch2002]. Diese Rohstoffe werden unter anderem zur Imprägnierung und bei der Herstellung von Stellwänden [Via2021], Klebeband [EcoTechnilin], Dämmstoffen [OEKOBÄU.DAT 2018], Mörtelverstärkungen [Saa2019] und Verbundstoffen [Yan2014] verwendet. Trotz eines weltweit expandierenden Marktes sinkt der Anbau von Lein in der EU aufgrund ungünstiger Wetterverhältnisse stetig [Agro-V]. Auch in Deutschland hat sich die Produktion in den letzten Jahren verringert [BMEL2020]. Die wachsende Nachfrage aus Deutschland wird durch Importe aus Russland, Kasachstan, Belgien und Polen bedient [CBI2019]. In Brandenburg gibt es derzeit aufgrund von Mangel an geeigneten Anbaugebieten für Lein kein verarbeitendes Baustoffgewerbe [Erzgebirgische Flachs].

Nessel (*Urtica dioica.*, *Urtica urens*):

Bei der Nessel handelt es sich um eine traditionelle Faserpflanze. Sie braucht tiefgründige, humose und nährstoffreiche Böden [vanBoc2013]. Außerdem benötigt sie eine gute Wasserversorgung während des vegetativen Stadiums im Juni und Juli [Brennessel Textil 2015]. Von Nachteil sind Standorte mit austrocknenden Winden [Bre1959]. Bisher gibt es nur wenige Wertschöpfungsketten für Nesseln. Neben Faserplatten [Akg2013] können aus ihnen Kohlenstoff-Nano-Blätter und Verbundwerkstoffe hergestellt werden [Akg2013]. Aufgrund ihres Steife- und Härtegerades können Nesselfasern auch gut als Ersatz von Glasfasern in Verbundwerkstoffen erhalten (Ebd.). In Brandenburg werden Nesseln für die Gewinnung von Textilstoffen großflächig auf 100 Hektar Land in Lüchow angebaut [vanBoc2013]. Weiterverarbeitende Betriebe für Baustoffe gibt es in Deutschland allerdings nur wenige. In Brandenburg fehlen sie bisher ganz [BMEL 2020].

Stroh:

Für das Bauen mit Stroh scheinen Roggen und Weizen als besonders geeignet [Kae2019]. Dabei handelt es sich um Rohstoffe, die mit jeweils 162.000 Hektar Anbaufläche im Jahr 2021 reichlich in Brandenburg vorhanden waren [Statistik Berlin Brandenburg 2022]. Konnten aus Roggen durchschnittlich 3,9 Tonnen Stroh pro Hektar gewonnen werden, so waren es beim Weizen sogar 5,9 Tonnen pro Hektar [Ebd.; Statistik Berlin Brandenburg 2021]. Aus ökologischen Gesichtspunkten bietet sich Stroh daher bei Wahrung der Nährstoffnachhaltigkeit auf der Fläche als regional verfügbares, landwirtschaftliches Nebenprodukt besonders als Baustoff an [Energie-Experten 2022]. Sofern gewisse Richtlinien eingehalten werden, kann es von allen Landwirten produziert werden [Baustroh2023]. In Berlin und Brandenburg ist die Herstellung von Baustoffen aus Stroh bereits sehr etabliert. So werden aus Stroh vorgefertigte Strohballe-Wandpaneele für die Wand- und Dachdämmung [DMP Gruppe 2022], Wärmedämmverbundplatten [Energie-Experten 2022], Strohpappe, Strohplatten, Strohpaneel-Systeme und leichte Strohlehm-Dämmstofffüllungen hergestellt [Carbon Smart Materials Palette 2023]. Verwendung finden diese Baustoffe bei der Umsetzung von Bauvorhaben von speziell auf Stroh ausgerichteten Ingenieurbüros, welche unter anderen den Ausbau des Passivhausmarktes vorantreiben [Imhoff 2018].

Schilf (*Phragmites australis*):

Schilf besiedelt überschwemmte und grundwassernahe, nährstoffreiche Standorte. In Abhängigkeit von Wasserversorgung und Genotyp können im Sommer 6,5 bis 23,8 Tonnen und im Winter 3,6 bis 15 Tonnen Trockenmasse pro Hektar produziert werden [Gau2014]. Traditionell kann Schilf als Dachreet genutzt werden. Auch als Zuschlagsstoff im Lehmbau, als Armierung und als Trittschalldämmung findet es Verwendung [Obe2019]. Aus Schilf gefertigte Baustoffe umfassen des Weiteren Dachdämmungen [FNR], Putzträger [Egginger Naturbaustoffe 2023] und Schalungsplatten [His2023]. Da die Anerkennung von Schilf als landwirtschaftliches Erzeugnis in Deutschland bisher nicht erfolgt ist und die Ernte mit Naturschutzauflagen im Konflikt stehen kann [Greifswald Moor Centrum 2016b], gibt es in Deutschland kaum Investitionen in Anbau und Erntetechnik von Schilf [Greifswald Moor Centrum 2019]. Hinzu kommt, dass eine regionale Schilfrohrproduktion vergleichsweise aufwendig und teuer ist, weswegen die Nachfrage auch durch ausländische Importe bedient wird. So stammen 85 % allen in Deutschland genutzten Schilfs aus Osteuropäischen Ländern wie Ungarn, Polen und Rumänien, oder sogar aus außereuropäischen Ländern wie der Türkei und China [Wic2015]. Wegen seiner einfachen Verarbeitung hat Schilf trotz hoher Transportwerte einen niedrigen Primärenergiebedarf und kann daher als effektiver Kohlenstoffspeicher angesehen werden [FNR2019]. Nutzungsmöglichkeiten als heimischen Baustoff sollten daher nicht ausgeschlossen werden.

Rohrkolben (*Typha*):

Rohrkolben wachsen in Feuchtgebieten und liefern jährlich bis zu 20 Tonnen Trockenmasse pro Hektar [FNR2019]. Aus ihnen gefertigte Baustoffe weisen eine hohe Schimmelresistenz auf, bieten guten Brand-, Schall- und sommerlichen Wärmeschutz und sind relativ einfach und mit niedrigem Energieaufwand zu verarbeiten [Fraunhofer-IBP 2023]. Für magnesitgebundene Dämmplatten werden Rohrkolben ebenso verwendet [Oeb2014], wie für Hohlkammerdämmplatten, so genannte Typhaboards [Land der Ideen 2023]. Die Fasern der Fruchtstände finden auch als Füllmaterial Verwendung [Greifswald Moor Centrum

2016a]. Meist kommen die Rohstoffe dafür aus Osteuropa, wo sie in großen Beständen im Donaudelta vorkommen [Fraunhofer-IBP 2014]. Bisher wird Rohrkolben in Deutschland noch nicht im betrieblichen Maßstab angebaut und verarbeitet. Erste Pilotversuche sind in Mecklenburg-Vorpommern zu finden [Greifswald Moor Centrum 2016a].

Süßgräser (*Miscanthus spec.*):

Süßgräser können überall dort angebaut werden wo auch Mais sich heimisch fühlt [Jäk2018]. Sie vertragen keine Staunässe, keinen Frost und auch keine starken Winde (Ebd.). Für optimale Erträge brauchen sie Niederschlagsmengen von 700-900 mm pro Jahr [Energiepflanzen 2022]. Auf sandigen, grundwasserbeeinflussten Lehm Böden erzielt die Dauerkultur im dritten Anpflanzjahr in Abhängigkeit von Bodenqualität, Wasserversorgung und Temperatur Erträge von 15 bis 25 Tonnen Trockenmasse pro Hektar [Jäk2018]. Auch auf relativ schlechten Kippenböden können sie gute Erträge erzielen [Fra2019]. 2019 wurden in Deutschland auf 4.600 Hektar Süßgräser für die Festbrennstoffgewinnung angebaut [FNR 2022; Tav2020]. Als Baustoff findet Süßgras Verwendung in der Herstellung von Armierungen und Dämmstoffplatten [Jäk2018]. Als Häckselgut wird es als Bauzuschlagsstoff für Lehmsteine und Lehmputz genutzt (Ebd.). Auch werden aus ihm Süßgrasballen-Bausteine gewonnen [Cm Staff 2016]. Anders als in Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern werden in Brandenburg aus Süßgräsern noch keine Baustoffe industriell hergestellt [Jäk2018]. Das liegt unter anderem daran, dass Anbau und Ernte bis dato noch verhältnismäßig teuer sind (Ebd.).

3.1.3. Agroforstsysteme

Der dritte Teil des APs 1 wählte einen qualitativen Ansatz, um die Potenziale von Agroforstsystemen für die Baubranche zu untersuchen. Dabei sollten einerseits das Akteursfeld definiert und zweitens die Potenziale aus Sicht der Akteur*innen herausgearbeitet werden. Dieses Kapitel ist eine Zusammenfassung der im Rahmen des Projektes bereits publizierten Projektergebnisse [Lit2023].

3.1.3.1 Methodik

Aus methodisch unterschiedlichen Interviewmöglichkeiten wurde für die Ableitung der (Biomasse-) Potenziale von Agroforstsystemen und deren Chancen und Herausforderungen das „problemzentrierte“ bzw. „halb-standardisierte Interview“ als geeignete Form identifiziert und methodengeleitet umgesetzt (siehe: [Lam1995, May2002, Wit1985]).

Die Bestimmung des Akteursfeldes erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde auf bestehende Kontakte der HNEE zurückgegriffen. Diese wurden mit einem Anschreiben kontaktiert, durch welches das Projekt vorgestellt und die Bereitschaft zur Mitwirkung abgefragt wurde. Darauf aufbauend wurde im „Schneeballprinzip“ in den Interviewleitfaden eine Frage inkludiert, mit der die Befragten darum gebeten wurden, das Akteursfeld in Brandenburg und weitere für sie zentrale Akteure zu benennen. Diese wurden in das Akteursfeld aufgenommen und kontaktiert. Die Interviews dauerten zwischen 30 und 60 Minuten und wurden online geführt. Dazu wurde die Software *BigBlueButton* verwendet. Die Interviews wurden aufgezeichnet, nachdem die Befragten jeweils über die datenschutzrechtlichen Vorgaben der HNEE (Satzung §7, 2022) [Hochschule für Nachhaltige Entwicklung 2022] informiert und um Zustimmung zur Aufnahme gebeten wurden. Zu allen Interviews wurden während des Gesprächs ergänzende Begleitprotokolle erstellt. Die Interviews wurden mittels der Transkriptionssoftware *Trint* verschriftlicht. Die Verschriftlichung fand als Wortprotokoll ohne zusätzliche Kommentierung statt. Das gesprochene Wort wurde im Original dokumentiert, also inklusive etwaiger Abweichungen vom Schriftdeutsch in Bezug auf Satzbau oder -struktur.

Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [May2007]. Als Auswertungstechnik wurde die Methode der inhaltlichen Strukturierung angewandt, da diese eine systematische Auswertung eines Interviews nach bestimmten Kriterien erlaubte, die anschließend wiederum eine Interpretation des Gesagten ermöglichten [May2007]. Die induktiv aus dem Datenmaterial erhobenen Auswertungskategorien sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Datenauswertung erfolgte mittels der Software *MaxQDA*

Tabelle 2: Induktiv gebildetes Kategoriensystem (links) und Beschreibung (rechts)

Kategorie	Beschreibung
Potenziale für die Baubranche in Brandenburg	<i>Welche Potenziale sieht der Befragte, aus Agroforstsystemen in Brandenburg Rohstoffe für die Baubranche bereitzustellen?</i>
Bedürfnisse und Bedarfe bei der Implementierung von Agroforstsystemen	<i>Was ist in struktureller und ökonomischer Hinsicht aus Sicht des Befragten notwendig, um Agroforstsysteme als spezifische Landnutzungsform in Brandenburg nachhaltig zu implementieren und zu stärken?</i>
Probleme und Hindernisse bei der Implementierung von Agroforstsystemen	<i>Welche strukturellen und ökonomischen Hindernisse und Probleme sieht der Befragte bei der Implementierung von Agroforstsystemen in Brandenburg?</i>
Akteur*innen und Vernetzung	<i>Welche Akteure hält der Befragte für die Agroforstbranche in Brandenburg für relevant? Wie beurteilt er die Zusammenarbeit mit den einzelnen, jeweils genannten Akteuren?</i>
Aussagen zur Agroforstsituation in Brandenburg	<i>Allgemeine Aussagen, die die ökonomische, ökologische oder soziale Situation in Bezug auf Agroforst als Landnutzungssystem in Brandenburg beschreiben.</i>
Potenziale von Agroforstsystemen (ökonomisch, ökologisch, sozial)	<i>Welche Potenziale attestiert der Befragte grundsätzlich Agroforstsystemen als spezifische Landnutzungsform in ökonomischer, ökologischer und sozialer Hinsicht?</i>
Funktionen und Aufgaben von Agroforstsystemen	<i>Welche Funktionen schreibt der Befragte grundsätzlich Agroforstsystemen als spezifische Landnutzungsform in ökonomischer, ökologischer und sozialer Hinsicht zu?</i>
Eigenes Verständnis vom ‚idealen Agroforstsystem‘	<i>Was ist in subjektiver Hinsicht ein ‚ideales Agroforstsystem‘? Wie muss es gestaltet sein?</i>
Eigene Verortung und Rolle in der Branche	<i>Wie definiert der Befragte seine eigene Rolle und seine Aufgaben in Bezug auf Agroforstsysteme? Welche Ziele verfolgt er oder sie? Welche Institution verfolgt er gegebenenfalls?</i>

3.1.3.2 Ergebnisse

Das Akteursfeld:

Die Studie zeigte, dass das Akteursfeld „Agroforst“ in Brandenburg aus elf Akteuren besteht. Dabei handelt es sich auf Produktionsseite um drei landwirtschaftliche Betriebe aus Brandenburg unterschiedlicher Größe, die Agroforstsysteme aufgebaut haben. Die Betriebe verfolgen dabei unterschiedliche Strategien: Die mittelgroßen Betriebe (370 bzw. 360 ha) ([LWg1], [LWg 2]) stellen die ökologische Melioration der Standorte und die stoffliche Nutzung der Holzserzeugnisse ins Zentrum ihrer Überlegungen und hoben die sozial-ökologische Komponente von Agroforstsystemen sowie die Möglichkeit zur kombinierten Nutzung (Flächeneffizienz) besonders hervor. Der Vertreter eines kleineren Betriebes (4,5 ha) ([LWk]) fokussiert sich in seinen Betriebszielen auf die Fruchtnutzung und Schaffung regionaler Vermarktungsstrukturen. Als zentraler politischer Akteur wurde der Fachverband für Agroforstwirtschaft e.V. (DeFAF) identifiziert ([VB]). Dieser setzt sich für die Verbreitung und Förderung von Agroforstsystemen in Deutschland ein und bündelt die Interessen und Anliegen von landwirtschaftlichen Betrieben mit dem Ziel, agroforstliche Landnutzung zu einem wesentlichen und anerkannten Bestandteil der Landwirtschaft in Deutschland zu entwickeln. Zwar operiert der Verband deutschlandweit, hat seinen Sitz allerdings in Brandenburg und ist dadurch dort besonders vernetzt. Die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) begleitet landwirtschaftliche Vorhaben sowie

Versuchsflächen wissenschaftlich durch Forschung und Lehre und fungiert als wichtiger Ansprechpartner für die landwirtschaftliche Praxis [SC]. Zwei land- und forstwirtschaftliche Beratungsfirmen führen dabei theoretisches und empirisch in Brandenburg gewonnenes Wissen zusammen. Daneben fungieren diese Beratungsfirmen als wichtige Wissensvermittler und Vernetzungsakteure zwischen den einzelnen Betrieben ([BE1], [BE2]). Als ebenfalls zentral erwies sich ein großer landwirtschaftlicher Betrieb aus Sachsen-Anhalt, der aufgrund seiner räumlichen Nähe und der signifikanten Fokussierung auf Agroforstsysteme ebenfalls als Teil des Akteursfelds identifiziert wurde ([LWg3]). Auf politischer Seite konnten die folgenden Teilbereiche identifiziert werden: Zum einen ein Vertreter einer politischen Partei des brandenburgischen Landtags, der inhaltlich Gesetzesvorhaben zu Anerkennung und Förderung von Agroforstsystemen bearbeitet ([POL]). Zum anderen das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK) in Brandenburg, das insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung von Förderrichtlinien von Bedeutung ist, indem es in Zusammenarbeit mit der Bundes- und Landesregierung EU-Richtlinien für Brandenburg umsetzt ([MS]). Fachlich und bisweilen kritisch begleitet werden die (praktischen) landwirtschaftlichen Vorhaben sowie die politischen Prozesse insbesondere im Hinblick auf Fördervorhaben vom nicht-amtlichen Naturschutz, der die ökologischen Aspekte der Landnutzung ins Zentrum stellt und betont ([NT]).

Zentrale Funktionen von Agroforstsystemen in Nordostdeutschland:

Die zentralen Funktionen von Agroforstsystemen konnten als großer Konsens zwischen den Akteuren aus den Interviews herausgearbeitet werden. Es zeigte sich, dass neben der Möglichkeit, Erträge auf landwirtschaftlichen Flächen durch erhöhte Flächeneffizienz und Risikostreuung zu erhöhen, vor allem ökologische Aspekte ins Feld geführt werden. Die Bodenmelioration durch Windbrechung, Erhöhung des Beschattungsgrades und Absenkung des Nährstoffaustrages wurde hierbei am häufigsten in Bezug auf die Funktionen von Agroforstsystemen genannt (12x). Daneben führten die Befragten die positiven Auswirkungen von Agroforstsystemen auf das Mikroklima an (Absenkung von Bodentemperatur und Evaporation (9x)). Ebenso fand die positive Beeinflussung der Biodiversität durch die Erhöhung von Strukturvielfalt und dem Aufbau von Habitatangeboten Erwähnung (9x). Zudem wurden Klimaschutzaspekte genannt, beispielsweise, dass durch die effizientere Flächennutzung die Funktion als CO₂-Senke erhöht wird (6x).

Die Bedeutung der Vernetzung von Akteuren zur weiteren Förderung von Agroforstsystemen in Brandenburg:

Um zu evaluieren welche Bedeutung die Vernetzung innerhalb des Akteursfeldes und zwischen einzelnen Akteuren im Hinblick auf den Ausbau von Agroforstsystemen als Landnutzungsform in Brandenburg spielt, wurden die Befragten gebeten, die ihrer Meinung nach wichtigsten Akteure und ihre Verbindung untereinander zu beschreiben.

a) Landwirte und DeFAF als zentrale Akteure, Agrarförderung in der Kritik: Im Hinblick auf die Gewichtung des Akteursfeldes zeigte sich sehr deutlich, dass insbesondere der Vertreter eines großen landwirtschaftlichen Betriebes [LWg1] als auch der Interessensverband DeFAF [VB] von allen Befragten als zentrale Dreh- und Angelpunkte innerhalb des Netzwerks bewertet wurden. Dies betrifft mit Bezug auf [LWg1] vor allem die Rolle als Vorreiter und Pionier in der Region, was die Implementierung und Bewirtschaftung von Agroforstsystemen in der untersuchten Region angeht. Hinzukommt eine als zielführend und effizient bewertete Kommunikation des eigenen Vorhabens durch [LWg1]. Dieser selbst versteht seine Rolle nicht allein als Landnutzer, sondern vor allen Dingen auch als politischer Akteur und Kommunikator. [LWg1] wird von den Akteuren beschrieben als „ein Landwirt, der hier den Gedanken gleich nach vorne rückt“ [MS], als „Vorreiter“, der seine Erfahrungen in die „Community“ hineinspielen würde [BE1], als „umtriebiger“ [LWg2] bzw. als sehr guter Kommunikator, „der einfach in dem Berufsstand sehr gut kommuniziert hat und dadurch sicherlich für die ganze Agroforstbewegung da ganz viel geleistet hat.“ [SC]. Dem Interessensverband DeFAF wurde von den Befragten eine wichtige Funktion für die Bündelung von Interessen, die Vernetzung der Akteure, den Einsatz für eine adäquate Förderlandschaft und die fachliche Beratung durch Wissensvermittlung attestiert. Die Akteure geben an, der DeFAF sei „der wichtigste Akteur“ [MS] bzw. dass über den Verband „die Vernetzung da einfach sehr, sehr gut gegeben“ sei [BE1]. Auch von Seiten des Naturschutzes wurde attestiert, der Interessensverband sei „ein

großer Player, beraten nicht nur in Brandenburg, sondern auch deutschlandweit, tun sich da zusammen, entwickeln sich dort als Fachverband“ [NT]. [LWg1] und [LWg2] gaben an, den DeFAF bereits „als Netzwerk [...] oder zumindest für Informationen“ genutzt zu haben. [BE1] und [SC] attestieren dem Verband er sei sehr aktiv und habe „den Fokus der Arbeit und auch der Projektarbeit sehr stark in Brandenburg gesetzt“ bzw. hätte „sicherlich diese Diskussion befeuert und hat auch die Hausaufgaben gemacht.“ Dem gegenüber zeigte sich, dass das für die Agrarförderung und damit auch für die institutionelle Förderung von Agroforstsystemen zuständige Ministerium [MS] von den Praxisakteuren einerseits als relevanter Akteur der Exekutive, andererseits wiederkehrend als Hemmschuh in Bezug auf die Umsetzung von Praxiszielen und auf finanzielle Förderung bewertet wurde. Kritisiert werden komplexe und bürokratische Förderstrukturen einerseits und eine zu zaghafte Antizipation der Bedürfnisse der sich aus Sicht der Praxisvertreter dynamisch entwickelnden Agroforstbranche.

b) Starkes Netzwerk und Pioniergeist: Zudem zeigte sich, dass insbesondere die Vertreter der Praxis (Landwirte und Berater) auf die Notwendigkeit einer intensiven und konstruktiven Vernetzung hinwiesen, um Agroforstwirtschaft als innovative Landnutzungsform publik zu machen und Vorbehalte vor allem bei Vertreter*innen der konventionellen Landwirtschaft abzubauen. Gleichzeitig fiel auf, dass sämtliche Akteure, unabhängig von der eigenen Verortung im Akteursfeld, die wechselseitige und vertrauensvolle Zusammenarbeit lobten, was als Stärke und wichtige Basis für die Entwicklung von Agroforstsystemen bewertet wurde. Dies sei, so eine wiederkehrende Aussage, damit zu begründen, dass es sich um eine verhältnismäßig kleine Gemeinschaft handle, bei der die einzelnen Akteure untereinander gut bekannt seien. Vor allem in der Beratungsbranche wurde dies beobachtet. So beschreibt [BE1] die Zusammenarbeit als „eigentlich sehr, sehr schön. Das ist ein sehr, sehr junger Sektor mit sehr wenigen Akteuren.“ Auch [BE2] erwähnt dies explizit und spricht davon, dass „sehr, sehr guter Kontakt“ zu den anderen Akteuren vorhanden sei, wodurch eine Netzwerkstruktur entstehen könnte. [BE2] sagt weiterhin: „Es ist viel Vernetzung, man kennt sich. [...] Das Thema ist verzahnt mit der ganzen regenerativen Landwirtschaft. [...] Es gibt eine Vernetzung in Richtung Naturschutz, wo auch Leute dann Interesse haben, mal in die Fläche zu gehen, etwas Neues zu machen. Also es ist ein sehr guter Austausch. [...] [...] Da entsteht jetzt einfach ein schönes Netzwerk, auf das wir dann alle zurückgreifen können.“ Auch in der wissenschaftlichen Begleitung wurde festgestellt, die Community sei „recht klein und überschaubar“ [SC]. Der Vertreter des Landtages beschreibt die Zusammenarbeit sehr konkret folgendermaßen: „Sehr gut. Man kann da mal ganz schnell ein Audio über WhatsApp machen und kriegt eine Antwort. Also da sind wir wirklich gut vernetzt und reagieren aufeinander sehr schnell.“ [POL]. Nach längerer Initialphase beginne die Gemeinschaft derzeit allmählich zu wachsen, was neben dem gewünschten Verbreitungseffekten auch die Vernetzung bisweilen erschweren würde, wie die befragten Berater berichten. Sie führen aus: „Das geht gerade so los, dass wir mitbekommen: okay, da sind auch Leute unterwegs, die wir noch nicht so kennen. Das war über Jahre eigentlich nicht der Fall, sondern da kannte man sich und wusste, wer was macht [...].“ [BE1]. Als maßgeblichen Grund für diese als konstruktiv bewertete Form der Zusammenarbeit wurde wiederkehrend ein gemeinsamer Pioniergeist erwähnt, der bei allen Beteiligten in ein Gefühl münden würde, gemeinsam jenseits klassischer agrarischer Strategien an einer innovativen und zukunftssträchtigen Landnutzungsform zu arbeiten und diese von ihren Grundzügen aus weiterzuentwickeln und zu fördern. Bestätigt wird dies durch einen Berater: „Und da geht es vor allem darum, dass man sich irgendwie unterstützt und eigentlich alle in der Gesinnung handeln: ‚Hey, wir wollen das voranbringen.‘“ [BE1]. Dieser Pioniergeist führe dann auch zu jener konstruktiven und als gemeinschaftlich empfundenen Zusammenarbeit. Agroforstwirtschaft sei zwar in theoretischer Hinsicht gut erforscht, hätte aber in der praktischen Umsetzung aufgrund hoher standortgebundener Abhängigkeiten zu einzelnen Flächen und einer generell noch unsicheren Wissensbasis hinsichtlich der Bewirtschaftung einen eher explorativen Charakter. Deshalb würden Wissensbestände, Erfahrungswerte und Fehlschläge innerhalb des Akteursfeldes weitgehend offen kommuniziert, um die Wiederholung der gleichen Erfahrung zu vermeiden. Besonders prägnant fasst dies [BE1] zusammen, der angibt, es sei „wenig Konkurrenzverhalten“ zu spüren. Vielmehr würden alle Beteiligten „sehr viel miteinander arbeiten und sich unterstützen und auch in einem sehr guten Austausch stehen. [...] Da gibt es einzelne Akteure, [...] die da dann mit Informationen so ein bisschen zurückhalten, weil sie sagen, ‚Hey, das war jetzt so viel Aufwand, diesen Erfahrungsschatz irgendwie zu

generieren, den wollen wir nicht einfach so teilen und weitergeben.‘ Aber das ist eigentlich wirklich die Ausnahme.“ [BE1].

Potenziale von Agroforstsystemen in Brandenburg, Materialien für die Baubranche bereitzustellen

Die Akteure wurden zudem nach ihrer Einschätzung zu den Potenzialen von Agroforstsystemen befragt, Materialien für die Baubranche bereitzustellen. Damit wurde eruiert, ob und inwieweit aus Sicht der Praxis, der Wissenschaft und der Verwaltung die Möglichkeit gesehen wird, mittels Agroforstsystemen nachwachsende und regenerative Baustoffe im Zuge einer Bauwende regional zu produzieren. Insgesamt wurde diese Fragestellung sehr differenziert beantwortet. Es zeigte sich, dass das Potenzial zwar grundsätzlich identifiziert, Agroforstsysteme jedoch noch nicht als Leistungsträger und Hauptquelle im Hinblick auf die Produktion von Baumaterialien bewertet werden. Neben Aussagen, die Agroforstsystemen dieses Potenzial klar attestierten, wurden als wesentliche Gründe die gegen eine solche Nutzfunktion sprechen, folgende Punkte genannt: Die im Vergleich zur Forstwirtschaft geringere Massenproduktion in Bezug auf Rohholzvolumen und Stammdurchmesser; Ressourcenkonflikte, die sich aus der Konkurrenz von Nahrungsmittel- und Rohstoffproduktion auf agrarischen Nutzflächen ergeben können sowie ökologische Aspekte, die sich konkret auf die standörtliche Situation in Brandenburg beziehen.

a) Nur wenig konkrete Potenziale: Es fiel auf, dass einzig die beiden Berater Agroforstsystemen ein größeres Potenzial attestierten. [BE2] sieht vor allen Dingen bei Pappel (*Populus nigra*) Verwendungsmöglichkeiten: „Verschleißholz, Bretter, Paletten und so was, kann man alles aus Pappel machen oder auch wenn man Furnierpappel hat, also auch Schäl-Furnier, dann Pappel-Multiplexplatten, die für den Innenausbau genutzt werden können. [...] Also da könnten wir glaube ich extrem, extrem viel Ressourcen für die Bauindustrie nutzen“. [BE1] sah ebenfalls „absolut die Sinnhaftigkeit darin [...]“. Den wesentlich geringeren Flächenverbrauch bei der Stammholzproduktion im Vergleich zu Forstflächen bei gleichzeitigen positiven Mitnahmeeffekten für das Agrarökosystem sieht er als „Riesenchance“. Gleichzeitig würde der spezifische Aufbau von AFS gegenüber den Hauptbaumarten im Wirtschaftswald eine höhere Sortimentsvielfalt forcieren: „Da stehen ganz andere Hölzer mit ganz anderen Qualitäten. Eigenschaften, die meistens sehr viel besser und spannender sind.“ [BE1]. Im Gegensatz dazu zeigten sich die anderen Befragten verhaltener. Sollten sich Baumaterialien aus Agroforstsystemen gewinnen lassen, dann seien diese in erster Linie Nebenprodukte bzw. Materialien für Land-, Forst- und Gartenbau. [VB] sagt dazu beispielhaft: „Also für Zaunpfähle und so, da gibt es auf alle Fälle Verwendung. Ich wüsste jetzt kein Beispiel, wo Gehölze tatsächlich in Sägewerke transferiert worden sind. Zumindest aus Brandenburg ist mir das nicht bekannt.“ Der Vertreter der Hochschule führte dahingehend aus, die brandenburgischen Agroforstsysteme seien derzeit „gerade so in der Wachstumsphase, die sind eigentlich noch nicht so weit, dass sie in der Phase sind, wo sie jetzt genutzt werden, also gerade, wenn es um Bauholz oder Wertvolles geht.“ [SC]. Der Vertreter der Landespolitik sieht das Potenzial neben der Produktion von Dämmstoffen (s.u.) mehr in der Energie- denn in der Bauwende und führt aus, dass eine strategische Produktion von Stark- und/oder Wertholz neben logistischen auch förderrechtliche Probleme mit sich bringen könnte. „Aber ansonsten [...] sind die Dimensionen, die man dann erntet, einfach zu klein, weil, wenn man das länger wachsen lassen würde, [...] dann ist man ganz schnell auch wieder in der Zwickmühle, dass es als Wald deklariert wird [...]. Da gäbe es dann eher Schwierigkeiten und dann müsste man es ja dann wirklich mit dem Harvester ernten und kommt dann eben doch auf ganz andere Preise und oder Kosten.“ [POL]. Zwar könne man Pfahlholz aus AFS gewinnen, „aber ansonsten, man erntet da jetzt nicht irgendwelche Balken oder irgendwelche Dinge, die man vielleicht für Dachlatten oder [...] für irgendwelches Gebälk verwendet. Das wird nicht passieren. [...] Also insofern, in der Bauwirtschaft denke ich das eher weniger einzusetzen.“ [POL]. Ein weiterer Akteur, der das Potenzial zur Bereitstellung von Baumaterialien mit Skepsis bewertete, bezog sich weniger auf die Massenproduktion, sondern auf die übergeordnete Frage der Landnutzung und Ressourcenverteilung. Zwei Befragte äußerten Bedenken dahingehend, dass im Hinblick auf den Auftrag der Nahrungsmittelproduktion der Landwirtschaft Konkurrenzsituationen entstehen können. Gefordert wurde in diesem Zusammenhang ein zumindest umsichtiges Vorgehen: „Ich habe das Gefühl, dass eine unheimliche Konkurrenz um Land entstanden ist. Das fing an mit den Biogasanlagen, ist jetzt ganz massiv mit Fotovoltaik auf dem Acker. Und jetzt kommen wir mit Rohstoffen vom Acker. Wir müssen dran denken, dass wir noch Acker brauchen. Wir bewirtschaften weltweit im

Prinzip fast alle ackerfähigen Böden. Wir können nicht ausweichen und wir müssen weiterhin die Menschen ernähren und gegebenenfalls Tierfutter erzeugen. Dass wir das nicht überschätzen, sozusagen, was vom Acker kommen kann. [...] Nicht: „Hurra, jetzt holen wir alles vom Acker.“ [LWg3]. Analog dazu sieht [BE1] trotz der zitierten Potenziale statt der bekannten „Tank-Teller-Diskussion“, die die Nutzung von Agrarflächen für die Produktion von Biotreibstoffen anstelle von Nahrungsmitteln kritisiert, eine „Bau versus Teller-Diskussion.“ Seiner Ansicht nach sei ein Kompromiss in der Landnutzung zielführend, der sowohl eine Bauwende unterstützen als auch die Nahrungsmittelproduktion berücksichtigen würde: „Okay, das Holz kommt für den Bausektor und der Rest drumherum sind aber weiter Nahrungsmittel ohne riesen Flächenverlust“ [BE1], was wiederum als Argument für die kombinierte Landnutzung in AFS gewertet wurde. Die naturräumliche Situation in Brandenburg und die standörtlichen Gegebenheiten würden außerdem dazu führen, dass eine ernstzunehmende Wertholzproduktion auf breiter Fläche schwierig umzusetzen sei. Der Vertreter des Ministeriums äußerte sich in Bezug auf die Standortansprüche verschiedener Hartholzarten beispielsweise wie folgt: „In Brandenburg haben wir sehr wenige Flächen, die fruchtbar sind. Und auf diesen Flächen, die weniger fruchtbar sind, ist wahrscheinlich eine Gehölzproduktion, die letztlich für Bauholz verwendet werden soll, schwierig umzusetzen.“ Der Befragte sieht eher in den weitreichenden Moorflächen Brandenburgs ein großes Potenzial für die Rohstoffproduktion: „Der Anbau von Paludikulturen [...], wo dann Schilf unter anderem als Dämmmaterial für Gebäude genutzt werden kann oder als Reet. Genau da würden auch die Potenziale liegen.“

b) Nichtholzprodukte: In Ergänzung dazu wurden von den Befragten etwaige Potenziale weniger in der Holzproduktion, sondern in der innovativen Verwendung von Nichtholzprodukten bzw. den agrarisch produzierten Stoffen gesehen. So äußerte sich [LWk], es sei für den Betrieb interessant, „mit den Schalen [der Früchte] halt auch zu experimentieren und zu gucken, wo kann man die dann in eine weitere Verwendung führen.“ Neben der nur im geringen Umfang zu leistenden Holzproduktion könne sich der Akteur „nicht vorstellen [...], welche Fasern, also welche Materialien noch Verwendung finden könnten, außer man kombiniert das jetzt mit Hanf oder so, wo dann wieder was draus gemacht werden kann“ [LWk]. Der Vertreter des Landtages sieht höchstens in der Produktion von Dämmmaterial ein eingeschränktes Innovationspotenzial: „Besser als Styropor, weil es eben ein natürlicher Baustoff ist. Und wenn man da die Hackschnitzel oder was auch immer dann als Abbauprodukt der Agroforstwirtschaft verwenden könnte, dann wäre das [Potenzial] etwas höher. [...] Und insofern ist es dann höchstens was wirklich für die Förderschnecke einer Heizung.“ [POL].

Hindernisse, Hemmnisse und Lösungsvorschläge in Bezug auf eine forcierte Implementierung von Agroforstsystemen in Brandenburg

In Summe ist festzustellen, dass sich die Befragten einerseits verhalten optimistisch gegenüber der konkreten Nutzung von Agroforstsystemen für die Baubranche zeigten, gleichwohl aber dieser Landnutzungsform ein großes ökologisches und ökonomisches Potenzial attestierten. Dies warf die Frage auf, welche Hindernisse und Hemmnisse vorliegen, die eine flächenmäßige Ausweitung behindern. Zwei klare Konsense konnten unter den Akteuren festgestellt werden: Erstens, die Förderrichtlinien im Agrargesetz einerseits und die damit verbundenen hohen bürokratischen Hürden, die viele landwirtschaftliche Betriebe von einer Implementierung von AFS abhalten würde. Es verblieben hohe Investitionskosten und ein ebenso hohes unternehmerisches Risiko bei den Landwirten. Insbesondere bei den Praxisvertretern konnte ein daraus resultierender hoher Frustrationsgrad identifiziert werden. Als zweiter Punkt wurde von Akteuren die Diskrepanz aus jährlichen landwirtschaftlichen Zyklen und mittelfristigen Bewirtschaftungskonzepten bei AFS sowie spezifischen, pachtgebundenen Eigentumsstrukturen in Brandenburg angeführt. Als Lösungsperspektive wurden neben einer verschlankten und gleichzeitig präziseren Förderstruktur eine Stärkung der Nachfrage des Marktes nach Holz genannt, die den Produzenten Sicherheit und Anreize verschaffen würden.

a) Förderstruktur, Bürokratie und ökonomisches Risiko: Der Akteur aus dem Naturschutz [NT] fasst die Situation folgendermaßen zusammen: Die Hindernisse reichten „von der Finanzierung, von der Förderung über das Land und auch über den Bund, die es ja bisher nicht gab und jetzt erst mit der neuen Agrarreform ein wenig Unterstützung geben soll.“ [LWg3] sieht eine daraus resultierende, enorm hohe

Arbeitsleistung auf Seiten der Landwirte, die viele Praxisbetriebe abschrecken würde: „Es steckt unheimlich viel Vorarbeit drin. Bis es überhaupt soweit kommt, dass so ein System auf den Acker kommt.“ Dies führe dazu, so der Vertreter des DeFAF, „dass jetzt nicht alle ‚Hurra‘ rufen, wenn es um Agroforstwirtschaft geht.“ [VB]. Diese Erfahrungen wurden von den weiteren Vertretern der Landwirtschaftsbetriebe bestätigt. [LWg2] kritisierte, dass die brandenburgische Agrarförderung Agroforstsysteme nicht als eigenständiges Landnutzungssystem führen würde, sondern diese fälschlicherweise Kurzumtriebsplantagen zurechnen würde. [LWg1] fasst zusammen: „Und man sieht, wie viel Bürokratie das ist, bevor man den ersten Steckling im Boden bekommt. Da verliert man die Lust. Das ist ganz einfach. [...] Das ist alles viel zu kompliziert und deshalb wird man es nicht machen.“ Der Vertreter der Landespolitik kritisiert spezifische Regeln zur Anlage der Systeme ohne „uns bekannte fachliche Grundlage“ [POL]. Diese und ähnliche bürokratische Vorgaben seien in doppelter Hinsicht problematisch: Einerseits, weil damit das Interesse in der Landwirtschaft, ein AFS anzulegen, von vornherein gedämpft, andererseits, weil damit der ökonomische Nutzen eingeschränkt werden würde. Neben bürokratischen Hürden wurden auch die Fördersummen erwähnt, die die realen Bewirtschaftungskosten nicht decken würden. [LWg3] kritisiert die ab 2023 geplante Fördersumme von 60€ pro Hektar im Vergleich zu den Kosten für Begründung und Pflege als deutlich zu wenig und als „ein Witz, das muss man einfach so deutlich sagen“. [LWg 2] bezeichnet das als „Tropfen auf den heißen Stein“, für den es sich als Landwirt nicht über eine etwaige, ökonomisch lohnende Anlage von AFS nachdenken ließe. Dies sieht auch der Vertreter der Landespolitik, der die grundsätzliche Ausrichtung der Landwirtschaft auf Fördermittel bemängelt und in Bezug auf die Förderung von AFS angibt, dass ein Landwirt in dieser Logik dann „mit 60 € den Hektar überhaupt nicht um über die Runden kommt, selbst wenn er dann hinterher die Hackschnitzel hat. Also das ist einfach nicht bezahlbar für den Landwirt. [...] 60 € der Hektar, das ist einfach zu wenig, da macht das niemand.“ [POL]. Damit fehlten finanzielle Anreize für die Landwirte und, so die Befragten, ein entscheidender Baustein zur Etablierung von AFS. „Wenn ich es nur allein von dem Produkt her nicht schaffe, wirtschaftlich zu sein, dann muss wenigstens die Anlage gefördert werden.“ [LWg1]. Es sei daher „nicht so, dass man das jetzt wirklich als attraktives Angebot sozusagen einordnen würde, vor allem, wenn man die hohen Investitionskosten dann dahinter sieht.“ [LWk]. Neben diesen würde oft übersehen, wie hoch die Betriebs- und Pflegekosten für ein Agroforstsystem seien („Wertastung beispielsweise oder auch eine Baumauswahl auf einem bestimmten Punkt. Die Implementierung, der Schutz der Bäume vor Wildverbiss, gegebenenfalls sogar Zäunung, Bewässerung“ [SC]). Ohne diese Investitionen sei die erfolgreiche Umsetzung eines AFS allerdings nicht denkbar, weshalb sich in Kombination mit der skizzierten Fördersituation ein betriebswirtschaftliches Risiko ergebe, vor dem sich viele Betriebe scheuen würden. „Es ist ein großes Risiko, was die Landwirte eingehen, wenn sie jetzt zum ersten Mal solche Systeme anlegen, erst mal nicht sofort real finanziert bekommen. Das heißt, diese ganzen Rohstofflöse, werden eben erst noch nach Jahren sozusagen fällig und dann kann man abschätzen, ob es sich gelohnt hat, ob die Rendite stimmt.“ [NT]. Im Gegenzug nahmen die Befragten [LWg1], [LWg2], [NT] und [SC] die Landes-, Bundes- und EU-Politik in die Pflicht, schlankere und praxistaugliche Förderstrukturen zu entwickeln und adressierten auf Landesebene vor allen Dingen das Ministerium [MT]. Folgende Aussage belegt dies beispielhaft: „Und dann muss man mal von seinem Kontrollwahn ein bisschen runterkommen. Und auch die Dokumentation muss deutlich einfacher werden als das, was jetzt gefordert ist, dieser bürokratische Wahnsinn nimmt seinen Lauf und ist nicht zu stoppen. Und da ist die Politik definitiv gefordert, neue Rahmenbedingungen zu schaffen und bessere Rahmenbedingungen. Aber das bitte schön mit uns zusammen und damit mit uns mein ich den DeFAF und die Landwirte, die am Ende mit diesen Systemen arbeiten müssen und wollen.“ [LWg1].

b) Landwirtschaftliche Bewirtschaftungszyklen und Eigentumsstruktur: Es wurde in Bezug auf die Eigentumsstruktur in Brandenburg wiederkehrend betont, dass die Laufzeit von Pachtverträgen oft unter einer potenziellen Umtriebszeit von AFS liegen würde. Damit würde man als Landwirt ein großes Risiko auf sich nehmen, „weil man nicht weiß, ob der Verpächter möglicherweise in drei Jahren sagt ‚Na ja, jetzt verpachte ich es nicht mehr, jetzt nehm´ ich die Fläche selber für mich‘. Oder es gibt einen Pachtwechsel oder wie auch immer“ [VB]. Dadurch würde eine Verbindlichkeit fehlen, die die Landwirte allerdings bräuchten, um ihre Landnutzung umzustellen. Dies wird nach Aussage der Befragten dadurch verstärkt, dass es der landwirtschaftlichen Arbeit inhärent sei, in Einjahreszyklen zu denken und planen. Der Umdenkprozess, der ohnehin durch die oben genannten Aspekte erschwert werden würde, sei damit

auch in ‚kultureller‘ Hinsicht herausfordernd. Der Vertreter des DeFAF fasst dies wie folgt zusammen: „Landwirtschaftsbetriebe denken in der Regel in Jahresscheiben. Wenn ich diesen Baum pflanze, muss ich erst mal schon fähig sein, da in Jahrzehnten zu denken. Das ist erst mal eine ganz große Denkaufgabe [...]“ [VB]. Dies führe, in der Sicht der Landwirte, zunächst zu einem Verlust von tatsächlicher Anbaufläche mit jährlichem return-of-invest. Der Vertreter der Hochschule sieht hier weiteren Aufklärungsbedarf: „Und das ist das Spannende bei den Agroforstsystemen, denn wir müssen, um es wirklich zusammenzubringen, ein langfristiges Management und ein langfristiges Denken in die Landwirtschaft reinbringen.“ [SC].

c) Perspektiven - Marktnachfrage generieren: Neben den Aspekten, die einer flächigen Implementierung von AFS im Wege stehen, wurden die Befragten auch nach möglichen Lösungsansätzen und Perspektiven befragt. Neben dem oben skizzierten Auftrag an das Ministerium die Förderstrukturen nachhaltig zu vereinfachen und zu reformieren, konnte als Konsens der Wunsch nach einer generierten Marktnachfrage identifiziert werden. Insbesondere die Befragten aus der landwirtschaftlichen Praxis bzw. dem Beratungssegment äußerten sich aufgrund ihrer Erfahrung in der Vermarktung landwirtschaftlicher Erzeugnisse dahingehend. [LWg1] betonte, dass der entscheidende Schlüssel für eine Potenzialausschöpfung eine nachgeschaltete Wertschöpfungskette vor Ort wäre, im konkreten Fall weiterverarbeitende Industrie, die den Landwirten eine Abnahmegarantie aussprechen würde. „Also, wenn es eine Nachfrage gibt, dann können wir die definitiv decken. Gerade mit schnell wachsenden Gehölzen braucht man nicht so viel Vorlauf.“ [LWg1]. [LWg3] geht davon aus, man könne für den Bausektor „vielmehr rausholen“, allerdings müsse dann dort „ein Umdenken einsetzen, wie wertvoll Holz ist. Dass nicht alles, was eine Abweichung von fünf Zentimeter auf fünf Meter hat, nicht mehr für den Bau nutzbar ist. Es ist sehr viel mehr für den Bau nutzbar als momentan gemacht wird.“ [LWg3]. [VB] kritisiert, dass die Verarbeitung des Holzes „halt immer sehr kostengünstig erfolgen muss und dass es für viele Holzsortimente nicht wirklich die Verwendung gibt.“ Gerade Pappelholz könne erfahrungsgemäß auch problemlos und nach der thermischen Behandlung im Außenbereich eingesetzt werden, auch bei anderen Holzarten sei dies möglich. Auch er kommt zu dem Schluss: „Das heißt, es fehlt tatsächlich aktuell die Abnahme für solche Bereiche“ [VB]. Die Beratungsbranche sieht dies ähnlich. [BE1] beschreibt den Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen im Bausektor als „riesig. Das sehen wir überall, an allen Statistiken und Zahlen und das wird auch noch weiter zunehmen“. Er wünscht sich, dass vor allem „aus architektonischer Sicht [...] zum Thema Leichtbau“ verstärkt aus Erzeugnissen aus AFS zurückgegriffen würde, da dort – wie bereits beschrieben – aufgrund des Kurzumtriebs andere Sortimente und Hölzer angeboten werden könnten, wodurch eine erhöhte Flexibilität gegenüber der klassischen Forstwirtschaft gegeben sei. Die Fokussierung auf die Wertschöpfungskette sei dabei „unglaublich wichtig.“ Da aber nach wie vor Unsicherheiten und ungeklärte Fragen existierten, brauche es neben Pioniergeist und Erfahrungswerten, die Aufgaben der Landwirte seien, „eine abnehmende Hand, die es schafft am Markt eine entsprechende Wertschöpfung zu generieren.“ Zur Kommunikation der landwirtschaftlichen Ziele und Potenziale schlägt er vor, dass partizipativ „auf Basis von Runden Tischen, Stakeholderworkshops, was weiß ich was mehr Bewusstsein und mehr direkter Kontakt von abnehmender Hand zu Produzent geschaffen wird.“ [BE1]. [BE2] argumentiert ähnlich, fordert aber auch die Landwirtschaft zu einer neuen Denkweise auf. Der überwiegend intensiv geprägten Branche in Brandenburg sieht er ein urban geprägtes gesundheitsorientiertes Käufermilieu gegenüber, das mittlerweile geänderte Anforderungen an Produkt und Produktion stellen würde: „Da werden Nüsse gefordert, Baumfrüchte, Maulbeerbaum zum Beispiel oder so, aber wer baut das in Brandenburg an? In den Bioläden findet man dann die getrockneten Beeren aus Osteuropa, aus Ungarn oder sonst wo. Aber in Brandenburg bei uns halt nur ein paar kleine Enthusiasten, also Kleinbetriebe, die vielleicht auch aus Quereinsteigern gegründet wurden. Und die Großen sind einfach mit ihrem Mindset völlig woanders.“ In diesem Mindset ginge es ausschließlich um ökonomisch-rationale Aspekte, also „dass da irgendwo die Zahlen am Ende stimmen und ein großes Kapitaleinkommen bei rauskommt.“ Das urbane Kundenmilieu mit hoher Kaufkraft könne so nicht zufriedenstellend bedient werden, gleichzeitig forcieren dies „mensenleere Landschaft“. Geänderte Betriebsstrukturen brächten dann neben verbesserten Vermarktungschancen regionaler Produkte auch ökologische und soziale Vielfalt mit sich. [BE2]. Insgesamt, so lässt sich abschließend festhalten, sehen die Befragten ein großes Potenzial einerseits, verweisen aber auf veraltete Strukturen, bürokratische Hürden und eine noch zu generierende Nachfrage. Das Gezeigte lässt sich damit

folgendermaßen zusammenfassen: „Es steckt total viel Potenzial drin, langfristig Landschaften und Landwirtschaft positiv zu verändern. Aber da braucht man eine gesamtgesellschaftliche Anstrengung dafür. Das können die Betriebe nicht allein.“ [LWg3].

3.1.4. Fazit AP1

Waldumbau braucht Zeit; Entscheidung über Biomasseströme von vielen Faktoren abhängig

- Waldumbau in Brandenburg wurde schon vor längerer Zeit begonnen, dauert aber.
- In den nächsten Jahren wird es noch ausreichend Kiefer geben, sofern keine Kalamitäten zu verzeichnen sind (Sturm, Waldbrand, Käfer).
- Erforschung und Nutzung „unbekannterer“ Baumarten (z.B. Ahorn, Linde, Pappel) und bislang wenig genutzter Baumkompartimente (Rinde, Äste..) und Entwicklung zur Marktfähigkeit (Normung) und Akzeptanz sollte schon heute begonnen werden.
- Einschlagsprognosen/ Biomasse-Potenzialberechnungen der letzten Jahre stellenweise nur noch sehr bedingt aussagefähig aufgrund von Datengrundlage (2012) und zwischenzeitlichen Kalamitätsereignissen.
- Nachfrage nach Holz wird weiter steigen (Bioökonomie), „freie“ Mengen sind nicht zu erwarten.
- Politische Rahmenbedingungen und finanzielle Unterstützung/ Förderprogramme werden mitverantwortlich dafür sein, welche Verwertungswege Holz nimmt, genauso wie gesellschaftliche Anforderungen wie z.B. Schutz- und Wildnisgebiete und Vergütung anderer Waldökosystemleistungen.
- Künftige Entwicklung sehr unsicher und kaum planbar. Dem Wald geht im wahrsten Sinne des Wortes das Wasser aus, mit kaum zu unterschätzenden Folgen

Holzbe- und verarbeitende Industrie in BB muss weiter zielgerichtet entwickelt werden; Umdenken ist notwendig

- Holz ist nicht zwingend ein regionales Produkt; viel Import aus/ Export in andere Bundesländer.
- Sägewerksstruktur in BB deutlich unterschiedlich im Vergleich zu Süddeutschland; wenige große Player dominieren; BB liefert auch Holz nach MV, SA und andere Bundesländer.
- In BB vor allem Holzwerkstoffindustrie in zwei Clustern zu finden (Heiligengrabe und Baruth/ Beeskow) und wenige, z.T. große Sägewerke.
- Nur wenige Holzbau-Unternehmen zu finden.
- Relevante Faktoren für Transformation:
 - Normung (speziell für Kiefer; nicht Fichtenanforderungen einfach übernehmen → Unternehmen müssen sich im Normungsprozess engagieren)
 - Zielgerichtete Zuordnung von Sortimenten direkt aus dem Bestand zu abnehmenden Betrieben, für möglichst effiziente Nutzung → Transparenz über Eigenschaften und Anforderungen entlang der gesamten Kette
 - Effizientere Gestaltung auch anderer Produktionsprozesse (z.B. Erhöhung Altholzanteil in Spanplatte)/effizientere Nutzung von Holz geringer Qualität
 - Kaskadennutzung / Holzrohstoffflüsse neu denken → Änderung der Holzindustrielandchaft notwendig?

Agroforstsysteme können langfristig Biomasse für die Bauwende liefern; Potenziale sind überschaubar

- Rahmenbedingungen:
 - Energie (KUP) vs. Stamm-/ Wertholz.
 - Anbaupotenzial langfristig vorhanden (KUP aufgrund dtl. kürzerer Rotation häufig bevorzugt).
 - Aktivierung heute notwendig aufgrund langen Wachstums der Bäume.
 - Bislang: v.a. Überzeugungstäter*innen zu finden; Holzproduktion steht i.d.R. nicht im Vordergrund.
 - Akteure sind als Agroforstsektor in BB sehr aktiv und gut vernetzt.
 - Neue Ansätze, Gelerntes, Innovationen können gut in den Sektor eingebracht werden.

- Steigerung der Attraktivität von Agroforst nötig (trotz aller ökologischen Vorteile):
 - Mehr Unterstützung wird benötigt, z.B. mehr politischer Rückenwind; finanzielle Unterstützung (entscheidend für eine mögliche Nutzung als Bauholz, aufgrund langer Rotation/ Umtriebszeit); kostenlose Beratung „auf dem Acker“; langfristige Kooperationen mit abnehmenden Betrieben
 - mehr transdisziplinäres Denken und Handeln, vom Anbau bis zur Nutzung im Holzbau.

3.2 Potentialanalyse regional verfügbarer Sekundärrohstoffe und Chancen, Strukturen und Narrative der Kreislaufwirtschaft in Berlin und Brandenburg (AP 2)

*Autor*innen Kapitel 3.2: Vera Susanne Rotter (Technische Universität Berlin), Katharina Kippert (Technische Universität Berlin), Johannes Scholz (Technische Universität Berlin), Mohadese Moorsalpoor (Technische Universität Berlin) in Kooperation mit Corinna Vosse (Kunst-Stoffe e.V.), Jan-Micha Gamer (Kunst-Stoffe e.V.), Simone Kellerhoff (Material Mafia), Jutta Ziegler (BAUFACHFRAU Berlin e.V.), Nora Wilhelm (Milkunstzentrale e.V.), Rodney La Tourell (Milkunstzentrale e.V.), Erik Goengrich (Milkunstzentrale e.V.)*

Während mit dem Begriff „Regeneratives Bauen“ die Bereitstellungen von Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen bezeichnet wird, wobei durch Photosynthese und Wachstum von Holz CO₂ aus der Atmosphäre gebunden wird, zielt der Begriff „Zirkuläres Bauen“ auf den Einsatz von Materialien aus dem Baubestand bzw. dem anthropogenen Lager, der „Urbanen Mine“, ab. Im Sinne einer kreislaufgerechten und ressourcenschonenden Bauwirtschaft liegt der Fokus des zirkulären Bauens auf der Wieder-/Weiterverwendung von Bauteilen und Bauprodukten (Vermeidung von Abfall) sowie hochwertigem Baustoffrecycling. In Abbildung 4 sind die Aspekte des zirkulären Bauens dargestellt. Ziel ist, den Einsatz von Primärrohstoffen sowie Deponierung und energetische Verwertung von Baustoffen zu vermeiden bzw. zu reduzieren und Bauprodukte, soweit möglich, durch Wieder-/Weiterverwendung und Recycling im Kreislauf zu führen.

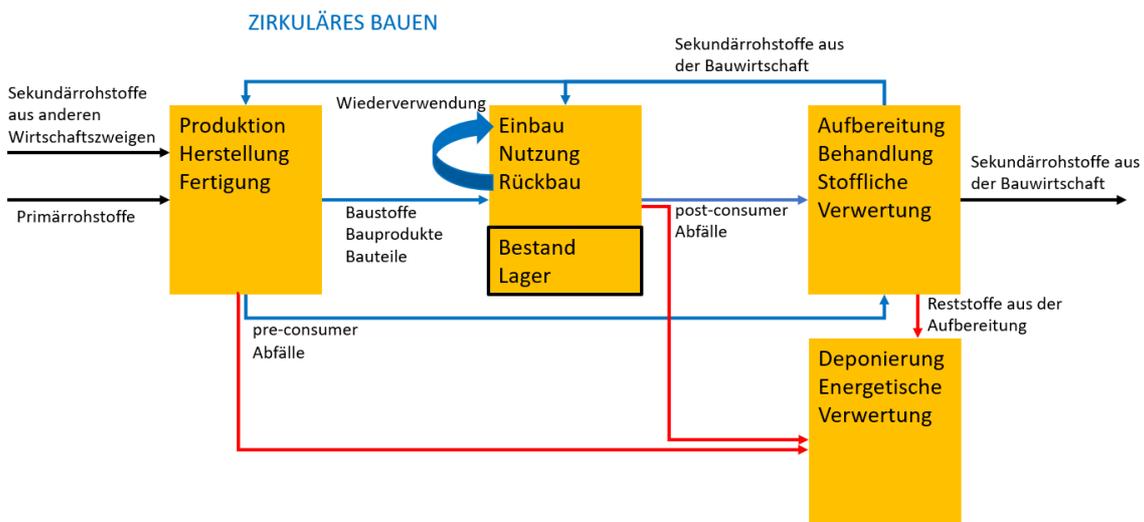


Abbildung 4: Schematische Darstellung von Stoffflüssen im Rahmen des Zirkulären Bauens

Im Sinne der langfristigen Bindung und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre sind beide Strategien wichtige Bausteine. Durch den Einsatz regenerativer Baustoffe kann die Masse an physisch gebundenem Kohlenstoff im Baubestand bzw. anthropogenen Lager erhöht werden. Dadurch wird gleichzeitig CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und physisch mittelfristig gebunden. Indem diese biobasierten Baumaterialien nachhaltig und nach den Prinzipien einer Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden, sichert zirkuläres Bauen die langfristige Speicherung des gebundenen Kohlenstoffs im Baubestand.

Recycling- und Verwertungsstrategien stellen eine relevante Stellschraube für den Übergang ins zirkuläre Bauen dar. Denn neben der Inputqualität entscheidet die gewählte Behandlungsstrategie eines Abfalles darüber, ob sich ein Output noch als hochwertiger Baustoff eignet, der weiterhin von seinen Materialeigenschaften profitiert, oder ob nur noch eine minderwertige Verwertung erfolgen kann. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die genaue Abgrenzung zwischen Minderwertigkeit und Hochwertigkeit nicht trivial ist und vom Einzelfall abhängt. Hilfestellung liefert hierfür die europäische Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) und das dieser folgende Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Diese

Regelwerke ordnen abfallwirtschaftliche Maßnahmen mittels der verankerten Abfallhierarchie hierarchisch nach deren Hochwertigkeit an. Für die genauen Definitionen der einzelnen Hierarchieebenen wird auf §3 KrWG bzw. das Glossar verwiesen. Bei der Beurteilung der Hochwertigkeit sind nach §6 KrWG folgende Kriterien zu berücksichtigen:

1. die zu erwartenden Emissionen
2. das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen
3. die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie
4. die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen

Das Arbeitspaket 2 untersucht Sekundärmaterialströme und deren Potenziale als hochwertige Materialquelle für das zirkuläre Bauen. Ein Fokus liegt auch auf Potenzialen der Wieder-/Weiterverwendung von Bauprodukten sowie dem hochwertigem Baustoffrecycling bezogen auf die untersuchten Materialströme. Die Abfallvermeidung in Form der Wiederverwendung von Erzeugnissen oder Bestandteilen ohne Abfalleigenschaft und die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfällen stellen die beiden obersten Ebenen der europäischen Abfallhierarchie dar. Diese können als hochwertige Maßnahmen zur Reduzierung von Abfallaufkommen und CO₂-Emissionen beitragen. Der Beitrag des zirkulären Bauens zu einer klimagerechten und nachhaltigen Bauwirtschaft liegt demnach in der Einsparung von CO₂-Emissionen für die Herstellung von Bauprodukten (embodied carbon) sowie der Verhinderung der Wiederfreisetzung des gebundenen CO₂ in z.B. Bauprodukten aus Holz. Der Bau von Gebäuden und Infrastruktur erfordert ein breites Repertoire unterschiedlicher Baustoffe. Die einzelnen Baustoffe unterscheiden sich stark bezüglich ihres Rohstoffeinsatzes bei der Herstellung, der lokalen Verfügbarkeit der Rohstoffe, der Emissionen über den Lebenszyklus und auch bezüglich der Recyclingfähigkeit. Während für Metalle wie Stahl und Kupfer global hohe Erfassungs- sowie Recyclingquoten mit Wiedereinsatz auf vergleichbareren Qualitätsniveau zu weitestgehend geschlossenen Kreisläufen führen, ist dies bei den Baustoffen Beton, Holz und Flachglas nicht der Fall. Hierfür sind u.a. materialinhärente Gründe verantwortlich. Die Infobox in Abbildung 5 zeigt die wesentlichen Merkmale der offenen Kreisläufe für diese Materialien.

Altholz	Beton und Bauschutt	Flachglas
Materialbeschreibung		
Als Altholz wird Industrierestholz und Gebrauchtholz beschrieben, soweit dieses Abfall im Sinne des §3 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist (§2 AltholzV). Es wird hierbei in drei Altholzkategorien unterschieden, von AI – naturbelassen oder lediglich mechanisch behandeltes Altholz – bis AIV – mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz.	Beton ist ein mineralischer Bau-toff aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser sowie ggf. Zusatzstoffen. Als Bauschutt wird i.d.R. eine Mischung mineralischer Bauabfälle beschrieben, welche neben Beton auch Ziegel, Fliesen und Keramik umfasst. In der AVV wird Bauschutt durch die Schlüsselnummern 170106* und 170107 beschrieben.	Als Flachglas wird jedes Glas in Form von Scheiben bezeichnet. Das gängigste Herstellungsverfahren ist das Floatglasverfahren. Der Haupteinsatzbereich von Flachglas ist die Bauwirtschaft.
Vorrangiges EoL (end of life)-Behandlungsszenario		
Thermische Verwertung	Stoffliche Verwertung als Gesteinskörnung im Straßenbau	Stoffliche Verwertung in der Behälterglasindustrie
Gründe für EoL (end of life)-Behandlungsszenario		
<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Vergütung bei thermischer als bei stofflicher Verwertung • Altholz der Kategorie IV darf nicht und der Kategorie III nur bedingt stofflich verwertet werden (Schadstoffgehalte) • Bedarf der stofflichen Verwertung (Spanplattenindustrie) begrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Derzeit keine Trennung der einzelnen Betonbestandteile möglich, Beton kann i.d.R. nur als Gesteinskörnung verwertet werden (Ansätze zur Substitution von Klinker durch gemahlene Zementstein vorhanden) • Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung in RC-Beton ist beschränkt • Vermischung verschiedener mineralischer Baustoffe beschränkt die möglichen Verwertungswege • Großer Bedarf an Gesteinskörnung mit relativ geringen Qualitätsanforderungen im Straßenbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätsanforderungen (Stör-stoffanteil, Reinheit) an Glasscherben in der Flachglasindustrie sehr hoch

Abbildung 5: Infobox EoL Altholz, Beton und Bauschutt sowie Flachglas

Diese offenen Kreisläufe der Materialfraktionen **Altholz, Beton und Bauschutt sowie Flachglas** bilden den Ausgangspunkt der durchgeführten Untersuchung. In diesem Sinne erfolgt eine Darstellung und Analyse des Potentials und möglicher Ansätze für zirkuläres Bauen in der Region Berlin-Brandenburg mit Fokus auf diese Materialfraktionen. Hierfür nimmt das Arbeitspaket 2.1 Stoffströme und regionale Wertschöpfungsketten in den Blick mit dem Ziel Potentiale und Ansatzpunkte für hochwertiges Recycling und/oder Wieder- und Weiterverwendung von Bauprodukten und aktuelle Hindernisse und Barrieren zu ermitteln. Von maßgeblicher Bedeutung ist zudem die bereits gebaute Umwelt als anthropogenes Lager und damit die Betrachtung vorhandener Bestände („Urbane Mine“). Das anthropogene Lager wird genutzt, um Potentiale der CO₂-Speicherung bzw. Vermeidung von CO₂-Emissionen durch Wieder-

/Weiterverwendung von Bauprodukten abzuschätzen und somit den möglichen Beitrag des zirkulären Bauens zu einer klimagerechten und nachhaltigen Bauwirtschaft abzuleiten.

Für die Kommunikation und Diskussion dieser Ansätze, werden in Arbeitspaket 2.2 ausgewählte Wieder- und Weiterverwendungsprozesse von Reststoffen mit Anwendungsfällen im Bausektor in Form von Prototypen untersucht und dargestellt. Diese Prototypen wurden von Initiativen aus dem Haus der Materialisierung für den Einsatz und den Einbau in den ProtoPotsdam Forschungspavillon entwickelt. Vor Ort sollen diese konkret anfassbar verschiedene Potenziale und Barrieren des zirkulären Bauens anfassbar, nachvollziehbar und kommunizierbar machen. Mit Hilfe von Etiketten werden Themen prägnant dargestellt. Anhand dieser Prototypen werden Möglichkeiten und Barrieren des zirkulären Bauens thematisiert und diskutiert.

3.2.1 Arbeitspaket 2.1: Stoffstromanalyse und regionale Wertschöpfungsketten

In diesem Teilarbeitspaket werden die aktuell anfallenden Abfallströme der Bauwirtschaft in Berlin-Brandenburg und der Status quo ihrer Behandlung dargestellt und Potentiale sowie Ansätze für hochwertiges Recycling bzw. kreislaufgerechtes ressourcenschonendes Bauen ermittelt. In diesem Zusammenhang wurden zudem die Akteure einer möglichen kreislaufgerechten ressourcenschonenden Bauwirtschaft in den Blick genommen, um aktuelle Hindernisse und Barrieren im Bauprodukterecycling sowie auf dem Weg zum zirkulären Bauen zu ermitteln und darzustellen. Weiterhin erfolgte eine Betrachtung vorhandener Bestände (mögliche zukünftige Abfallströme), um das Potential der CO₂-Speicherung bzw. Vermeidung von CO₂-Emissionen durch Wieder-/Weiterverwendung von Bauprodukten abzuschätzen.

3.2.1.1 Methodischer Ansatz

3.2.1.1.1 Materialflüsse, Quellen und Lager

Um das Potential für das Recycling bzw. die Wiederverwendung von Baumaterialien in Berlin und Brandenburg zu ermitteln sowie in Baumaterialien gespeicherte Kohlenstoffmengen und Einsparpotentiale von CO₂-Emissionen durch Verlängerung der Nutzungsdauer bzw. des Lebenszyklus von Baumaterialien zu quantifizieren, wurden einerseits die derzeitigen Materialflüsse, die für ein Recycling zur Verfügung stehen, d.h. Abfallströme, betrachtet, andererseits wurden zusätzlich auch mögliche zukünftig verfügbare Quellen und bestehende Lager, d.h. verbaute Materialien im Bestand (anthropogenes Lager), analysiert. Als Datengrundlage wurden hierfür Abfallbilanzen sowie, wenn vorhanden, Bestandskartierungen herangezogen.

3.2.1.1.1 Abfallstatistiken und -bilanzen

In Deutschland werden für die Berichtspflichten der Verordnung (EG) Nr. 2150/2002 (Abfallstatistikverordnung) die Daten für die 51 Abfallkategorien der ‚European Waste Classification for Statistics (EWC-stat)‘ mit den bestehenden Erhebungen der Abfallstatistik nach dem Umweltstatistikgesetz (UStatG) erstellt. Die EWC-stat baut auf dem Europäischen Abfallverzeichnis (EAV) gemäß Entscheidung 2000/532/EG bzw. Beschluss 2014/955/EU auf. Anhand des EAV werden Abfallarten in der EU für administrative Zwecke klassifiziert, d.h. für Genehmigungen und Überwachung im Bereich der Abfallerzeugung und des Abfallmanagements. Das EAV definiert 839 Abfallarten, die in 20 Kapitel gegliedert sind, hauptsächlich nach der Herkunft des Abfalls (d.h. dem Wirtschaftszweig oder Prozess der Entstehung). Für die EWC-stat werden diese 839 Abfallarten nach Materialeigenschaften in die o.g. 51 Abfallkategorien gruppiert [Eurostat2010]. Zur Umsetzung der Entscheidung 2000/532/EG wurde in Deutschland die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)) vom 10.12.2011 eingeführt, welche zuletzt am 30.06.2020 geändert worden ist. Grundlage der Abfallstatistik bzw. Abfallbilanz sind die an den Behandlungs- und Entsorgungsanlagen erfassten Abfälle zuzüglich der Exporte notifizierungspflichtiger (gefährlicher) Abfälle. Obwohl die Daten von den jeweiligen statistischen Ämtern der Bundesländer erhoben werden, werden nicht in allen Bundesländern zusätzlich länderspezifische Abfallbilanzen erstellt, da hier zusätzlich in andere Bundesländer ausgeführte

Abfallmengen bekannt sein müssen. Einigen statistischen Landesämtern stellen in Folge länderspezifischer Gesetzgebung ergänzende Daten zur Berechnung ihrer Abfallbilanz zur Verfügung [Statistisches Bundesamt 2022]. Gemäß §21 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) sowie nachgeordneten Landesgesetzen sind öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (öRE) zudem zur Erstellung von Abfallbilanzen der in ihrem Gebiet anfallenden und ihnen zu überlassenden Abfälle verpflichtet. Nicht überlassungspflichtige Abfälle, wie z.B. Bauschutt oder Speiseabfälle aus der Gastronomie werden i.d.R. in diesen Bilanzen nicht erfasst.

Trotz diverser Vorgaben zur Erfassung des Abfallaufkommens und der Abfallbehandlung werden die Daten auf unterschiedliche Weise berichtet und dargestellt. Dies hängt stark vom jeweiligen Zweck der Abfallstatistik bzw. Abfallbilanz ab. Oftmals werden auch nur zusammengefasste Daten veröffentlicht und keine Daten auf Ebene der einzelnen Abfallschlüssel. Aus diesem Grund wurden für die Betrachtung der Abfallströme, neben der Verwendung öffentlich verfügbarer Abfallstatistiken und -bilanzen, zusätzliche Daten beim Amt für Statistik Berlin-Brandenburg bzw. bei der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz Berlin und dem Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz Brandenburg abgefragt. Daten zu einzelnen Behandlungs- und Entsorgungsanlagen unterliegen dem Betriebsgeheimnis und dürfen daher aus Datenschutzgründen i.d.R. nicht weitergegeben bzw. veröffentlicht werden. Für Berlin liegen mit der Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz (SKU-Bilanz), welche alle zwei Jahre erstellt wird, für bestimmte Abfallströme jedoch sehr detaillierte Daten vor [Vog2021].

Für den vorliegenden Bericht wurden exemplarisch die Abfallströme Altholz, Beton und Bauschutt sowie Flachglas betrachtet, welche die folgenden in Abbildung 6 aufgelisteten Abfallschlüssel umfassen. Weitere Anteile der o.g. Abfallströme sind unter den Abfallschlüsseln 170903 „sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischter Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten“, 170904 „gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 170901, 170902 und 170903 fallen“ und 200301 „gemischte Siedlungsabfälle“ zu finden.

	Altholz	Beton und Bauschutt	Flachglas
pre-consumer	03: Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen, Papier und Pappe 030101: Rinden- und Korkabfälle 030104*: Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, die gefährliche Stoffe enthalten 030105: Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, mit Ausnahme derjenigen, die unter 030104 fallen 030301: Rinden- und Holzabfälle	10: Abfälle aus thermischen Prozessen 101314: Betonabfälle und Betonschlämme	101111* (anteilig): Glasabfall in kleinen Teilchen und Glasstaub, die Schwermetalle enthalten (z.B. aus Kathodenstahrröhren) 101112 (anteilig): Glasabfall mit Ausnahme desjenigen, der unter 101111 fällt
	15: Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (a. n. g.) 150103: Verpackungen aus Holz 150110* (anteilig): Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind		
post-consumer	17: Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten) 170201: Holz 170204* (anteilig): Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	170101: Beton 170106*: Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten (wird allgemein als Bauschutt bezeichnet) 170107: Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 170106 fallen (wird allgemein als Bauschutt bezeichnet)	170202: Glas 170204* (anteilig): Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind
	19: Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke 191206*: Holz, das gefährliche Stoffe enthält 191207: Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 191206 fällt		191205 (anteilig): Glas
	20: Siedlungsabfälle (Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen), einschließlich getrennt gesammelter Fraktionen 200137*: Holz, das gefährliche Stoffe enthält 200138: Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 200137 fällt 200307 (anteilig): Sperrmüll		

Abbildung 6: Zu den betrachteten Abfallströmen Altholz, Beton und Bauschutt und Flachglas zugehörige Abfallschlüssel

3.2.1.1.2 Bestandskartierungen

Eine flächendeckende Kartierung des Gebäudebestandes und der Baumaterialien im Lager (anthropogenes Lager) existiert derzeit nicht. Exemplarisch wurde dies im Rahmen von Forschungsprojekten auf Gebäude-, Quartiers- oder Stadtebene umgesetzt [Sch2015]. Zur Quantifizierung verbauter Materialien im Bestand werden derzeit i.d.R. Abschätzungen mittels Materialintensitäten herangezogen, d.h. Mengen werden mittels Koeffizienten für durchschnittlich

verbautes Material z.B. in t/m², t/m³ oder t/km abgeschätzt. Konkrete Daten werden derzeit nicht erhoben bzw. liegen nicht vor. Durchschnittliche Materialintensitätskoeffizienten für verschiedene Gebäude- und Infrastrukturtypen wurden in verschiedenen Studien auf regionaler und teilweise nationaler Ebene ermittelt. Für Berlin liegt eine Bestandskartierung für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie Infrastruktur des Umweltbundesamtes vor [Buc2022]. Die ermittelten Zahlenwerte für die einzelnen betrachteten Materialien wurden bei den Autoren abgefragt, da diese im Bericht nur graphisch dargestellt sind. Mittels dieser Bestandskartierung wurden die Mengen an verbauten CO₂-Emissionen (embodied carbon), physisch gebundenem Kohlenstoff und möglichen bei Abbruch des Bestandes und Aufbereitung der Baustoffe entstehenden CO₂-Emissionen (emissions EoL treatment) berechnet. Hierfür wurden die jeweiligen verbauten Materialmengen mit materialspezifischen Faktoren für herstellungsbedingte CO₂-Emissionen, Gehalte an physisch gebundenem Kohlenstoff und CO₂-Emissionen am Ende des Lebenszyklus multipliziert. Die Faktoren wurden anhand von Literaturwerten festgelegt. Für die CO₂-Emissionen am Ende des Lebenszyklus wurde das wahrscheinlichste Szenario für das jeweilige Baumaterial angenommen (EoL-Behandlungsszenario). Durch Transporte entstehende CO₂-Emissionen wurden nicht berücksichtigt, da diese sehr individuell sind.

3.2.1.1.2 Akteure einer möglichen kreislaufgerechten ressourcenschonenden Bauwirtschaft

Beim Baustoffrecycling sowie auf dem Weg zum zirkulären Bauen spielen verschiedenste Akteure auf verschiedenen Ebenen eine Rolle, von der Herstellung von Bauprodukten, der Planung und Ausschreibung von Gebäuden und Infrastruktur, der Ausführung, dem Rückbau bis hin zur Aufbereitung und Verwertung von Baustoffen. Die gesetzlichen Grundlagen sowie die Entscheidungen der Genehmigungsbehörden bilden hierbei die Rahmenbedingungen, innerhalb derer Handlungsspielraum besteht. Eine Übersicht der Akteure ist in Abbildung 7 dargestellt.

Zur Untersuchung des Potentials für das Recycling von Baumaterialien in Berlin und Brandenburg sowie für eine Hindernis- und Barrierenanalyse einer möglichen kreislaufgerechten ressourcenschonenden Bauwirtschaft wurden die weiter hinten in der Wertschöpfungskette angesiedelten Akteure in den Blick genommen (vgl. Markierung in Abbildung 7). Hierzu wurde einerseits die aktuell vorhandene Behandlungsinfrastruktur (Entsorgungs(fach)betriebe) in Berlin und Brandenburg untersucht, sowie wurden andererseits Interviews mit verschiedenen Akteuren im Bereich Baustoffrecycling durchgeführt.

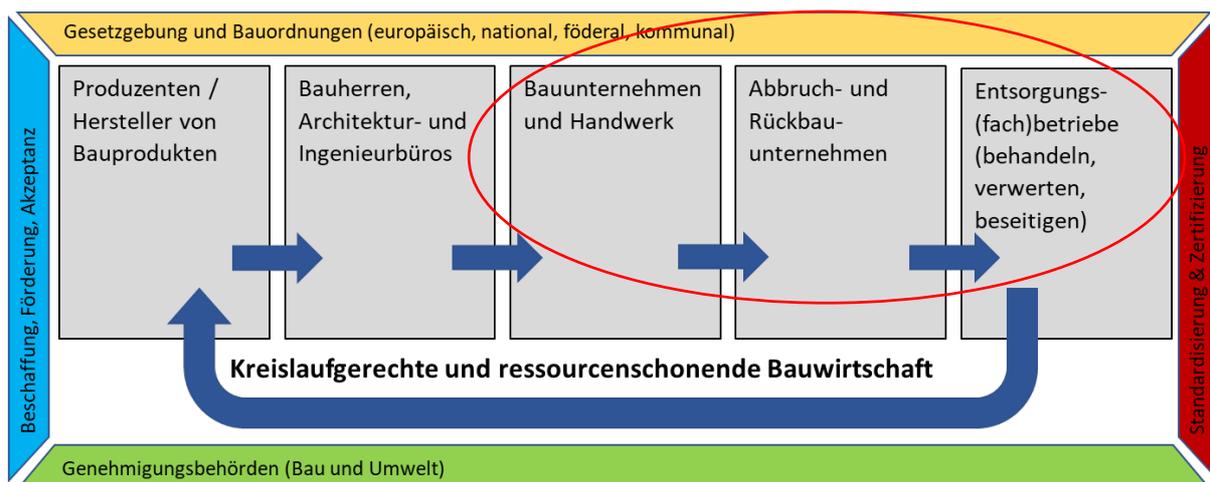


Abbildung 7: Akteure und Rahmenbedingungen einer kreislaufgerechten ressourcenschonenden Bauwirtschaft

3.2.1.1.2.1 Mapping von Entsorgungs(fach)betrieben in Berlin und Brandenburg

Zur Untersuchung der vorhandenen Behandlungsinfrastruktur in Berlin und Brandenburg wurde auf das Fachbetrieberegister gemäß Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische

Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften (Entsorgungsfachbetriebeverordnung - EfbV) zurückgegriffen. Je betrachtetem Abfallschlüssel (vgl. Abschnitt 0) wurden alle Entsorgungsfachbetriebe, die eine Zulassung für die Behandlung, Verwertung oder Beseitigung dieses Abfallstroms haben, aufgelistet. Anschließend erfolgte eine geographische Visualisierung. Hierbei ist anzumerken, dass im Entsorgungsfachbetrieberegister nur gemäß EfbV zertifizierte Betriebe und nicht alle an der Entsorgung von Abfällen beteiligten Betriebe gelistet sind. Die Anforderungen an die Zertifizierung sind in der EfbV geregelt. Das Register und die Zertifizierung basieren hierbei auf EfbV, §1 und KrWG, §56 Absatz 2. Wenn möglich, wurden weitere bekannte Betriebe ergänzt.

3.2.1.1.2 Interviews mit Akteuren im Bereich Baustoffrecycling

Es wurden insgesamt neun qualitative Expert*inneninterviews mit Akteuren im Bereich Baustoffrecycling durchgeführt. Die Interviewpartner*innen haben zum Großteil eine leitende Funktion in den jeweiligen Unternehmen inne und/oder sind Experten auf dem Themengebiet Baustoffrecycling und/oder Wiederverwendung von Bauprodukten.

Die Interviews wurden nach dem Prinzip des leitfadengestützten Interviews durchgeführt. Der Leitfaden findet sich in Anhang A_2. Hierin ist zudem eine Übersicht über die durchgeführten Interviews enthalten. Ziel der Interviews war, Einschätzungen beteiligter Akteure zum Potential regional verfügbarer klima- und kreislaufgerechter sowie ressourcenschonender Baumaterialien durch Baustoffrecycling und zirkuläres Bauen zu erhalten und derzeitige Hindernisse und Barrieren zu evaluieren. Die Interviews wurden, soweit dies von den Interviewpartner:innen genehmigt wurde, aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Bei zwei der durchgeführten Interviews wurde eine Aufzeichnung nicht genehmigt. Die Inhalte wurden während dieser Interviews von den Interviewer*innen schriftlich festgehalten, anschließend zusammengeführt und den Interviewpartner*innen zur Überprüfung vorgelegt.

Die Interviews wurden anschließend im Hinblick auf die Fragestellung „Was sind die derzeitigen Barrieren und Hindernisse, die hochwertigem Recycling und/oder der Wiederverwendung von Bauprodukten im Wege stehen?“ nach dem Prinzip der qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring, Fenzl 2019) analysiert. Es erfolgte eine zusammenfassende Inhaltsanalyse mittels induktiver Kategorienbildung, d.h. es wurden anhand der vorliegenden Dokumentation, sukzessive Hindernisse und Barrieren identifiziert und für diese dann entsprechende Kategorien (Codes) festgelegt. Die einzelnen Kategorien wurden anschließend den vier Arten von Barrieren der Kreislaufwirtschaft nach [Kir2018] – rechtlich/regulatorisch, gesellschaftlich, technisch und ökonomisch/marktbedingt – zugeordnet. Die Codierung erfolgte mit der Software MAXQDA durch die Interviewerin. Eine Übersicht der Kategorien (Codelist) kann Anhang A_3 entnommen werden. Die relevantesten Barrieren und Hindernisse wurden mittels semiquantitativer Analyse identifiziert. Hierfür wurden die codierten Segmente in den Interviews quantitativ ausgewertet und die Anzahl der Nennungen der einzelnen Kategorien ermittelt, d.h. Hindernisse und Barrieren, die in mehreren Interviews genannt wurden, wurden als die relevantesten eingestuft. Wurde in einem Interview mehrfach dasselbe Hindernis/dieselbe Barriere (Kategorie) genannt, erfolgte nur eine einfache Wertung. Eine Übersicht über die codierten Segmente ist in Anhang A_4 enthalten.

3.2.1.2 Ergebnisse und Visualisierungen

3.2.1.2.1 Abfallaufkommen Altholz, Beton und Bauschutt sowie Flachglas in Berlin und Brandenburg 2020

Die Abfallmengen für die betrachteten Abfallschlüssel (vgl. Abschnitt 0) in Berlin und Brandenburg aus dem Jahr 2020 wurden beim Amt für Statistik Berlin-Brandenburg abgefragt. Es liegen Daten aus zwei unterschiedlichen Erhebungen vor. Bei der Erhebung über die Abfallentsorgung handelt es sich um den Input der nach BImSchV genehmigungspflichtigen Abfallentsorgungsanlagen im jeweiligen Bundesland [Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2022]. Dieser Input kann aus dem eigenen Bundesland kommen, jedoch auch aus anderen Bundesländern. Hierbei wird jedoch nicht differenziert, aus welchen anderen Bundesländern dieser kommt. Zudem benötigen einige Bauschuttaufbereitungsanlagen, insbesondere

kleinere Mobilanlagen, keiner Genehmigung nach BImSchV und werden damit nicht in der Statistik erfasst. Alle zwei Jahre wird daher zusätzlich eine Erhebung über die Aufbereitung und Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen durchgeführt [Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2022]. Hierbei wird jedoch der Input nicht nach Herkunft ausdifferenziert. Die Mengen aus den beiden genannten Statistiken sind in Anhang A_6, A_7 und A_8 detailliert dargestellt. Nach Auskunft des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg ist eine Addition der erhobenen Abfallmengen und auch ein Vergleich dieser nicht möglich. Insgesamt können mit den vorliegenden Daten daher keine genauen Angaben zu den in Berlin und Brandenburg anfallenden Abfallmengen gemacht werden, es erfolgte ausschließlich eine grobe Abschätzung.

Für gefährliche Abfälle (Abfallschlüssel, die mit einem „*“ gekennzeichnet sind) muss ein elektronisches Abfallnachweisverfahren (eANV) geführt werden. Hierdurch liegen für diese Abfallschlüssel i.d.R. deutlich detaillierte Daten vor, da der Weg des Abfalls vom Ort des Anfalls (Abfallerzeuger), über den Transport (Abfallbeförderer) bis zum Ort der Entsorgung (Abfallentsorger) mittels Begleitscheinen dokumentiert werden muss. Für hochwertiges Baustoffrecycling bzw. zirkuläres Bauen spielen diese Abfallströme jedoch keine Rolle, da Schad- bzw. Gefahrstoffe i.d.R nicht im Kreislauf belassen, sondern ausgeschleust werden sollen. Schadstoffentfrachtung wird für die Kreislaufwirtschaft als notwendig erachtet, jedoch kommt es hierbei zu einem Zielkonflikt zwischen der Schadstoffausschleusung und der Erhöhung der recycelten Mengen [Hor2020]. Einige abfallwirtschaftliche Regelungen, wie die Ersatzbaustoffverordnung oder die POP-Verordnung enthalten daher Anforderungen zur Ausschleusung bzw. Entsorgung von schadstoffhaltigen Materialien.

Bei Vernachlässigung der gefährlichen Abfälle, die für hochwertiges Baustoffrecycling bzw. zirkuläres Bauen keine Rolle spielen, und der Abfallschlüssel, die nur anteilig Mengen des jeweiligen Stoffstroms enthalten, konnten folgende für hochwertiges Baustoffrecycling bzw. Wieder-/Weiterverwendung theoretisch vorhandenen Mengen in Berlin und Brandenburg anhand der beiden statistischen Erhebungen für das Jahr 2020 abgeschätzt werden:

- **Altholz: 797.230 Mg** (Erhebung über die Abfallentsorgung; Input der Anlagen in Berlin und Brandenburg, die aus dem eigenen Bundesland stammen, zusätzlich des Inputs der Anlagen in Berlin, der aus anderen Bundesländern stammt, da davon ausgegangen wird, dass dieser zum Großteil aus Brandenburg stammt)
- **Beton und Bauschutt: 3.314.195 Mg** (Erhebung über die Aufbereitung und Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen; Input der Anlagen gesamt, da davon ausgegangen wird, dass die Mengen zum Großteil aus dem eigenen Bundesland stammen; Verwertung i.d.R. in einem Umkreis von 30-50 km)
- **Flachglas: 2.232 Mg** (Erhebung über die Abfallentsorgung; Input der Anlagen in Berlin und Brandenburg, die aus dem eigenen Bundesland stammen, zusätzlich des Inputs der Anlagen in Berlin, der aus anderen Bundesländern stammt, da davon ausgegangen wird, dass dieser zum Großteil aus Brandenburg stammt)

Da für Berlin zusätzlich zu den regulären Abfallstatistiken für einige Abfallströme die sehr detaillierte SKU-Bilanz (vgl. Abschnitt 0) vorliegt, wurden diese Daten mit den beiden Abfallstatistiken verglichen, siehe Anhang A_9. Es konnten hier bei einigen Abweichungen festgestellt werden. Dies liegt zum einen daran, dass in der SKU-Bilanz die Stoffstrombilanzen sowohl der in Berlin angefallenen als auch behandelten Abfälle dargestellt werden, bei den Abfallstatistik hingegen nur die in Berlin behandelten Abfälle erfasst werden. Eine Diskrepanz entsteht u.a. durch Abfälle, die in Berlin anfallen, jedoch außerhalb Berlins behandelt werden. Zum anderen werden in den beiden Abfallstatistiken jeweils nur bestimmte Anlagentypen betrachtet, wodurch Teilmengen der Abfallströme nicht enthalten sind. Die Abweichungen für den Abfallschlüssel Sperrmüll lassen sich hiermit jedoch nicht erklären und bleiben unklar.

Die ermittelten o.g. Zahlen sind mit Vorsicht zu behandeln, da es sich hierbei nur um eine grobe Abschätzung basierend auf den verfügbaren Daten handelt. Um zudem das tatsächliche Recyclingpotential abzuschätzen, spielt die praktische Recyclingfähigkeit eine Rolle. Auf diese wird in der

Diskussion (siehe Abschnitt 0.2.3) eingegangen. Die aktuelle Situation des Altholz-, Beton-/Bauschutt- und Flachglasrecyclings ist in den folgenden Abschnitten dargestellt.

3.2.1.2.2 Aktuelle Situation Altholz-, Beton-/Bauschutt- und Flachglasrecycling

Der Marktanteil der Wieder-/Weiterverwendung von Bauprodukten ist derzeit noch sehr gering und in den Statistiken nicht ausgewiesen. Das Recycling von Baumaterialein ist hingegen gängige Praxis. Entscheidend für ein (hochwertiges) Recycling von Baustoffen sind sortenreine Abfallströme. Im April 2017 wurde die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) mit dem Ziel der Anpassung an die Abfallhierarchie novelliert. Gemäß §8 GewAbfV sind seit August 2017 Bau- und Abbruchabfälle im Wesentlichen in folgende Fraktionen zu trennen, wenn dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, und nach Maßgabe des KrWG vorrangig zur Wiederverwendung vorzubereiten oder dem Recycling zuzuführen [Hil2018; Ros2019]: Glas, Kunststoffe, Metalle (einschließlich Legierungen), Holz, Dämmmaterialien, Bitumengemische, Baustoffe auf Gipsbasis, Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik.

Eine entscheidende Rolle für die späteren Verwertungsmöglichkeiten von post-consumer/post-use Baumaterialien spielt die Art des Rückbaus bzw. Abbruchs von Gebäuden. Dieser kann auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist hierbei, wie viel Aufwand für die Trennung von Baumaterialien betrieben wird und zu welchem Zeitpunkt die Separierung stattfindet. Dies hat Einfluss auf die Sortenreinheit der einzelnen Abfallströme. Beim konventionellen Abbruch wird das Gebäude ohne vorherige Entkernung oder begleitende Separierung von Baumaterialien abgebrochen. Eine Trennung erfolgt entweder nachträglich oder die Abbruchmaterialien werden komplett als Baumischabfall entsorgt. Beim selektiven Abbruch werden die Baumaterialien vor, während oder nach dem Abbruch getrennt. Eine deutlich bessere Trennung von Baumaterialien wird beim selektiven Rückbau erreicht. Hier werden die unterschiedlichen Baumaterialien vor dem Abbruch der Tragkonstruktion sortenrein zurück- bzw. ausgebaut. Eine weitere Möglichkeit ist die Demontage, welche jedoch vorrangig bei Stahlkonstruktionen oder historischen Bauten zum Tragen kommt [Hil2018]. In den folgenden Abschnitten wird die aktuelle Situation des Recyclings der drei betrachteten Abfallströme, Altholz, Beton-/Bauschutt und Flachglas kurz dargestellt. Im pre-consumer Bereich werden die einzelnen Abfallströme i.d.R. sortenrein gesammelt [Hil2018; Ros2019].

3.2.1.2.2.1 Altholz

Altholz wird anhand der Altholzverordnung (AltholzV) nach Behandlungsgrad und Schadstoffgehalt in vier Altholzkategorien eingeteilt, von A I – naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz bis zu A IV – mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz. Die AltholzV gilt gleichermaßen für Industrierestholz (pre-consumer) als auch Gebrauchtholz (post-consumer). Aktuell wird Altholz vorrangig energetisch verwertet. Für eine höherwertige stoffliche Verwertung zu Holzwerkstoffprodukten sind nur Althölzer der Kategorie I und II sowie eingeschränkt der Kategorie III zugelassen. Studien belegen, dass ca. 75% aller im Bauwesen eingesetzten Hölzer einer Kaskadennutzung zugeführt werden könnten, da sie keine zu hohen Schadstoffwerte aufweisen [Hil2018]. Somit könnte ein viel höherer Anteil der stofflichen Verwertung zugeführt werden. In Abbildung 8 sind die Altholzstoffströme in Deutschland im Jahr 2015 dargestellt. Demnach wurden etwa 88% des angefallenen Altholzes energetisch verwertet, etwa 9% wurden stofflich verwertet und etwa 3% exportiert. Die Verwertungsentscheidung von Altholz hängt zudem stark von den Preisen, der Verfügbarkeit und der Klimawirkung herkömmlicher Energieträger wie Kohle und Gas ab. Da Holz als nachhaltiger Brennstoff gilt, stellt Altholz einen lokal verfügbaren, nachwachsenden und verhältnismäßig klimaschonenden Brennstoff für die Strom- und Wärmegewinnung dar, welcher auch in vorhandenen Kohlekraftwerken verbrannt werden kann. Stark steigende Preise für Energie haben damit auch einen direkten Einfluss auf die Verwertungsentscheidung von Altholz, da sich die Abnehmer mit der Veränderung der Preise ändern.

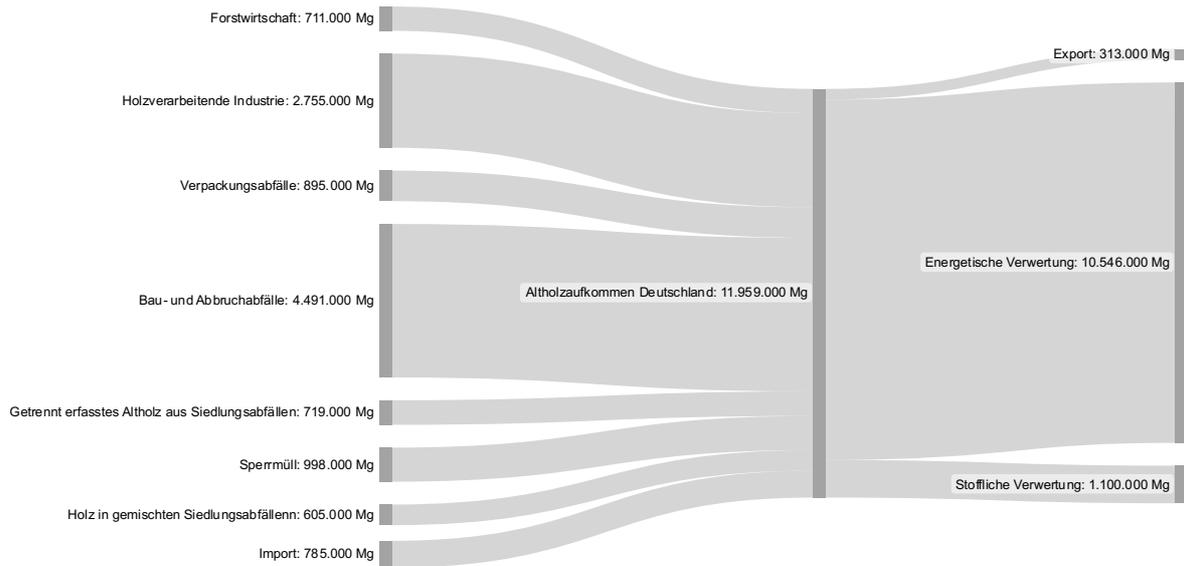


Abbildung 8: Altholzaufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2015 in Mg, eigene Darstellung nach [Ste2019]

3.2.1.2.2 Beton und Bauschutt

Bei Beton und Bauschutt liegen die Recyclingquoten mit über 75% insgesamt sehr hoch [Fre2023]. Sowohl Beton als auch Bauschutt (hiermit wird i.d.R. der Abfallschlüssel 170107 bezeichnet – eine Mischung aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik) wird hierbei i.d.R. gebrochen, zu Recycling-Gesteinskörnung aufbereitet und anschließend zum Großteil im Straßenbau eingesetzt. Nur ein sehr geringer Teil wird höherwertig in der Betonherstellung verwendet. Jedoch handelt es sich auch hier nicht um einen geschlossenen Kreislauf, da aus gebrochenem Beton aktuell nur unter erneutem Zusatz von Zement wieder Beton hergestellt werden kann. Der recycelte Beton übernimmt hier vorrangig die Funktion der Gesteinskörnung [Hil2018; Bas2021]. Als Alternative zum Zement wird in Abschnitt 3.0 Geopolymer als Bindemittel für die Betonherstellung erprobt. In Deutschland werden zurzeit nur 0,5% (EU-weit ca. 6%) des Betonbruchs wieder zu Recycling-Gesteinskörnung für neuen Beton verarbeitet [Hil2018]. In Abbildung 9 sind die Bauschuttstoffströme in Deutschland im Jahr 2012 dargestellt. Demnach werden etwa 94% des Bauschutts stofflich verwertet, der Großteil hiervon im Straßenbau, gefolgt von Erdbau, Verfüllung und Deponiebau und Betonzuschlag. Etwa 6% des Bauschutts werden deponiert. Pre-consumer Abfälle spielen bei diesem Abfallstrom keine entscheidende Rolle.

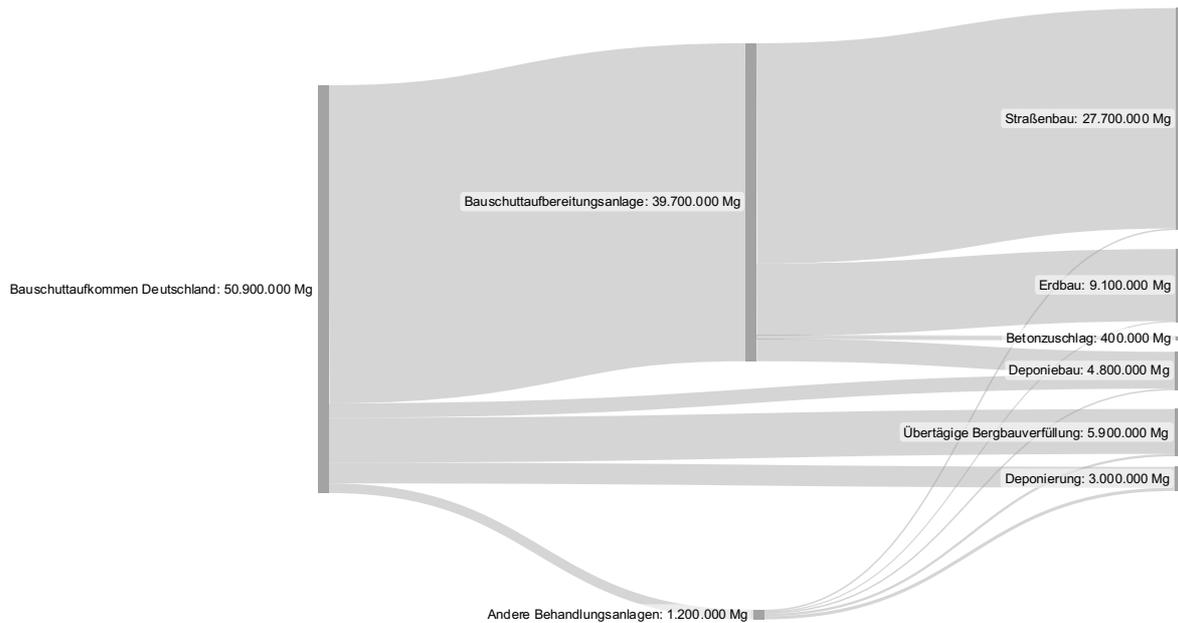


Abbildung 9: Bauschutt aufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2012 in Mg [Ste2019]

3.2.1.2.2.3 Flachglas

Flachglasabfälle werden i.d.R. einem Recycling zugeführt (ca. 96%). Ein geringer Anteil wird deponiert (ca. 4%). Die aus Flachglasabfällen erzeugten Rezyklate werden derzeit nur zu einem geringen Anteil wieder in der Flachglasproduktion eingesetzt (ca. 12%). Vorrangig werden diese in der Behälterglasproduktion (52%) sowie in anderen Bereichen, wie der Herstellung von Mineralwolle, Glasperlen und Glasmehl (ca. 36%) verwendet. Hintergrund hierfür sind wirtschaftliche Aspekte sowie die im Vergleich zu anderen Verwendungszwecken höheren qualitativen Anforderungen in der Flachglasproduktion. Ein nicht unerheblicher Anteil an Flachglasabfällen fällt im pre-consumer Bereich an. In Abbildung 10 sind die Stoffströme für Flachglas in Deutschland im Jahr 2016 dargestellt.

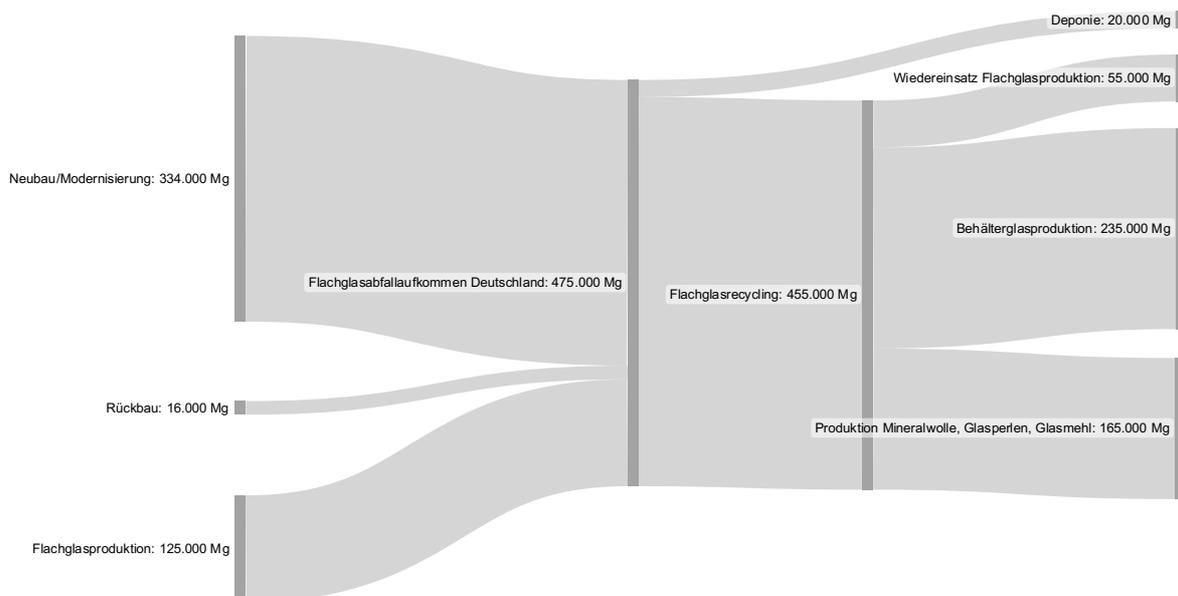


Abbildung 10: Flachglasabfall aufkommen und -verwertung in Deutschland im Jahr 2016 in Mg, eigene Darstellung nach [Ros2019]

3.2.1.2.3 Visualisierung des Mappings der Entsorgungs(fach)betriebe in Berlin und Brandenburg und der Abfallströme Altholz und Beton und Bauschutt in Berlin 2020

Anhang A_10 enthält eine Liste der Entsorgungs(fach)betriebe in Berlin und Brandenburg, die gemäß der in Abschnitt 3.2.0 beschriebenen Methodik ermittelt wurden. Für eine geografische Visualisierung der vorhandenen Behandlungsinfrastruktur wurden diese anschließend auf einer Karte dargestellt, siehe hierzu Anhang A_11, A_12 und A_13. Hierbei erfolgte eine visuelle Einteilung anhand des behandelten Abfallstroms und den Anlagentypen. Insgesamt wurden 157 Anlagen in Berlin und Brandenburg ermittelt, die den Abfallstrom Altholz behandeln, verwerten und/oder beseitigen bzw. hierfür eine Zulassung haben, sowie 127 Anlagen für den Abfallstrom Beton und Bauschutt und 30 Anlagen für den Abfallstrom Flachglas. Daten zu den in den jeweiligen Anlagen tatsächlich behandelten Abfallarten und -mengen liegen nicht vor, da diese dem Betriebsgeheimnis unterliegen und daher auch nicht von den statistischen Ämtern zur Verfügung gestellt werden können.

Mittels der durch die SKU-Bilanz sehr detailliert vorliegenden Daten für die Abfallströme Altholz und Beton und Bauschutt in Berlin 2020 konnten für diese Abfallströme bzw. Teilabfallströme, da nicht alle Abfallschlüsselnummern des jeweiligen Abfallstroms erfasst wurden, Abfallbilanzen erstellt werden, in denen die an der Behandlung des jeweiligen Abfallstroms beteiligten Akteure, soweit möglich, dargestellt werden (Abbildung 11 und Abbildung 12). Neben den Mengen der Abfallschlüssel, für die keine detaillierten Daten vorliegen, ist zudem die Rate an Wiederverwendung nicht bekannt bzw. wird in Abfallstatistiken nicht erfasst

Abbildung 11: Massenströme Altholz in Berlin 2020 in Mg, eigene Darstellung nach (Vogt, Harju, Gonser Dezember 2021)

Massenströme Altholz nach beteiligten Akteuren in Berlin 2020 (AVV-Nr.: 170 201, 200 138, 200 307 (anteilig), 200 301 (anteilig) und 170 904 (anteilig))

Grafische Darstellung: Simon Heidenreich und David Bauer

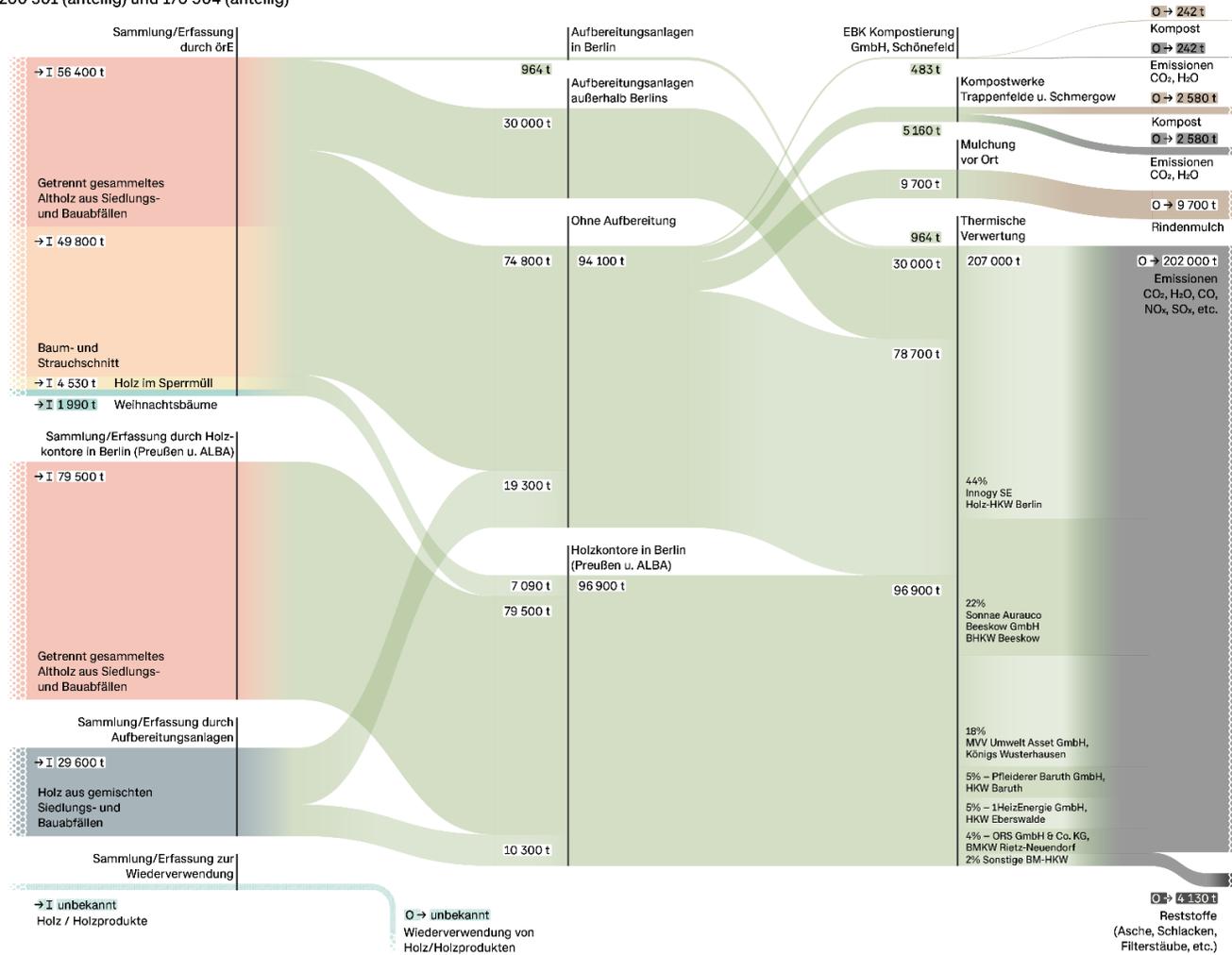
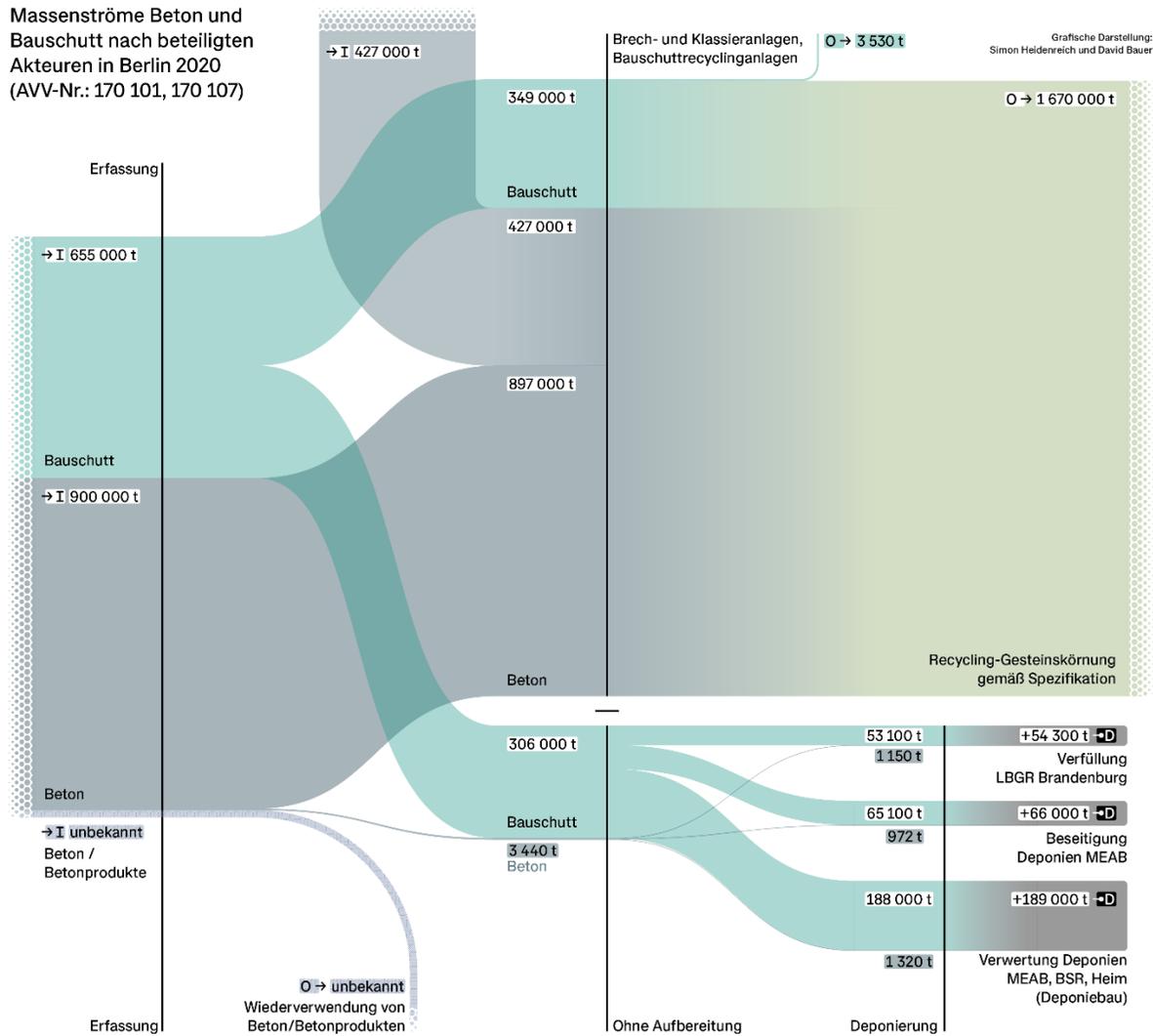


Abbildung 12: Massenströme Beton und Bauschutt in Berlin 2020 in Mg, eigene Darstellung nach (Vogt, Harju, Gonser Dezember 2021)



3.2.1.2.4 Gespeicherte Kohlenstoffmengen im Bestand und Einsparpotentiale von CO₂-Emissionen durch zirkuläres Bauen am Beispiel Berlin

Auch beim hochwertigen Recycling im Sinne des zirkulären Bauens entstehen CO₂-Emissionen. Dies gilt gleichfalls auch für die Wieder-/Weiterverwendung, da hier CO₂-Emissionen bei Transport und ggf. Vorbereitung der Bauprodukte entstehen. Die Verlängerung der Nutzungsdauer bzw. des Lebenszyklus von Baumaterialien hat jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Dauer der CO₂-Speicherung in bzw. Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Baumaterialien. Mit der für Berlin vorliegenden Bestandskartierung zu im Bestand (Gebäude und Infrastruktur) verbauten Materialien wurden die verbauten CO₂-Emissionen (embodied carbon), der physisch gebundene Kohlenstoff und mögliche bei Abbruch des Bestandes und Aufbereitung der Baustoffe entstehende CO₂-Emissionen (emissions EoL treatment) berechnet. Die detaillierten Ergebnisse können der Tabelle in Anhang A_14 entnommen werden.

Insgesamt konnten exemplarisch für das Jahr 2020 folgende Mengen ermittelt werden:

- Verbaute Materialmengen (Gebäude und Infrastruktur): 594 Millionen Mg
- Verbaute CO₂-Emissionen (embodied carbon, cradle-to-gate): 125 Millionen Mg CO_{2eq}
- Physisch gebundener Kohlenstoff (stored carbon): 10,1 Millionen Mg CO_{2eq}
- Emissionen EoL-Behandlungsszenario (emissions EoL treatment): 7,47 Millionen Mg CO_{2eq}

Die Aufteilung nach einzelnen Baustoffen ist in Abbildung 13 dargestellt. Es wird deutlich, dass Beton und Ziegel den Großteil der verbauten Materialien im Bestand (Gebäude und Infrastruktur) ausmachen. Bei den verbauten CO₂-Emissionen verschiebt sich das Verhältnis und neben Beton und Ziegel spielen auch Metalle und Glas eine entscheidende Rolle, da bei deren Herstellung große Energiemengen benötigt werden. Der physisch gebundene Kohlenstoff findet sich vorrangig im Holz, jedoch auch in anderen organischen Baumaterialien. Die Karbonatisierung von Beton wurde hierbei nicht berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass die ermittelten Zahlen nur einen groben Orientierungswert darstellen. Insbesondere bei den Mengen der nicht mineralischen Baustoffe wurde durch die Autoren der Bestandskartierung [Buc 2022] darauf hingewiesen, dass diese nicht weiter validiert wurden. Zudem sind die möglichen bei Abbruch des Bestandes und Aufbereitung der Baustoffe entstehenden CO₂-Emissionen sehr variabel. Einerseits wurde im vorliegenden Fall nur das derzeit vorrangige EoL-Behandlungsszenario betrachtet, welches für die meisten Baustoffe keinem hochwertigen Recycling entspricht, und andererseits ist der Aufbereitungsaufwand auch stark von Faktoren wie sortenreiner Trennung der Materialien abhängig.

Zum Vergleich entsprachen die CO₂-Gesamtemissionen aus dem Endenergieverbrauch in Berlin im Jahr 2020 14,89 Millionen Mg [SenUMVK 2022]. Hiermit wird das signifikante Einsparpotential von CO₂-Emissionen durch Lebenszyklusverlängerung von Baumaterialien deutlich, da keine neuen Materialien hergestellt werden müssen und die bei der Herstellung entstehenden Emissionen (embodied carbon) vermieden werden können. Hierbei ist nach der Erhaltung und Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur insbesondere die Wieder-/Weiterverwendung von Bauprodukten ohne umfassende Aufbereitung anzustreben, da auch Emissionen durch die Aufbereitung von Baustoffen für das Recycling entstehen. Insbesondere bei Altholz zeigen die berechneten Werte, dass eine möglichst lange Wieder-/Weiterverwendung der Bauprodukten anzustreben ist, da durch die große Menge an physisch gespeichertem Kohlenstoff die Dauer der CO₂-Speicherung deutlich verlängert werden kann und Bauholz hiermit als CO₂-Senke fungiert.

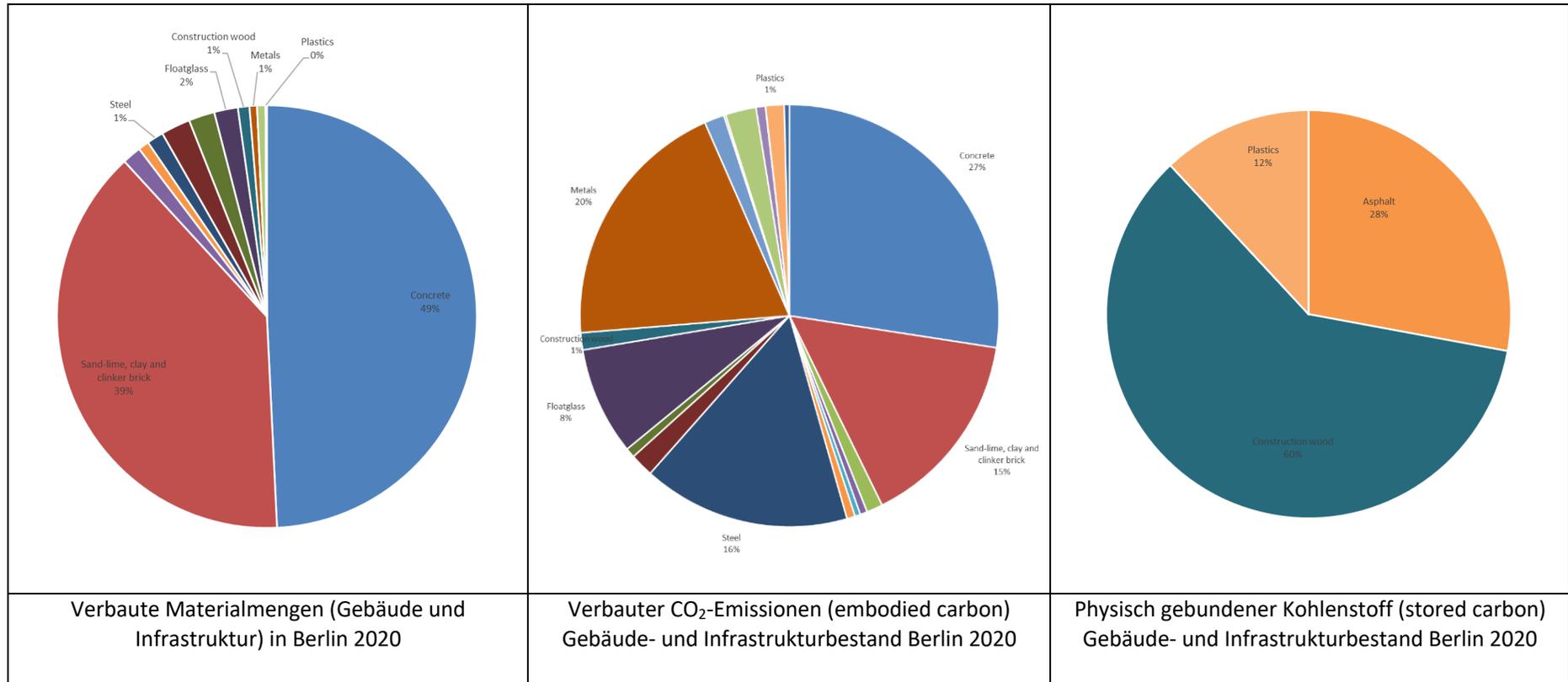


Abbildung 13: Verbaute Materialmengen, verbaute CO₂-Emissionen (embodied carbon) und physisch gebundener Kohlenstoff (stored carbon) im Gebäude- und Infrastrukturbestand Berlin 2020

Sollte eine Wieder-/Weiterverwendung nicht möglich sein, ist eine Kaskadennutzung anzustreben, da hiermit die Dauer der CO₂-Speicherung nochmals verlängert werden kann. Ein Problem stellen ggf. mit Schadstoffen belastete Althölzer dar, welche nicht im Kreislauf belassen, sondern ausgeschleust werden sollten. Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Beim Betonrecycling sollte berücksichtigt werden, dass Beton selbst bei Verwertung als Ausgangsstoff einer Betonrezeptur nicht wieder zu Beton wird, sondern der aufbereitete Beton derzeit nur als Gesteinskörnung eingesetzt werden kann. Rezyklierte Gesteinskörnung darf je nach Expositionsklasse des Betons zudem nur bis zu einem maximalen Anteil von 45% eingesetzt werden [Bre2021]. Der Zement, welcher vorrangig für die Emissionen bei der Herstellung von Beton verantwortlich ist, muss weiterhin hinzugefügt werden. Da eine Wieder-/Weiterverwendung von Betonbauteilen i.d.R. schwer ist (oftmals begrenzte Möglichkeiten des zerstörungsfreien Ausbaus, Aufwand beim Transport), ist ein besonderer Fokus auf Erhaltung und Instandhaltung zu legen. Beim Flachglas bzw. Fenstern und Fassadenbauteilen ist zu überlegen, inwieweit die Wieder-/Weiterverwendung zu einer Einsparung von CO₂-Emissionen führt, da die Einsparung von CO₂-Emissionen durch Einsatz neuer energetisch höherwertiger Fenster und Fassadenbauteile unter Umständen so groß sein kann, dass die CO₂-Emissionen, die durch Einschmelzen und Herstellung neuer energetisch höherwertigerer Fenster entstehen, kompensiert werden. Dies ist im Einzelfall zu betrachten.

3.2.1.2.5 Hindernis- und Barrierenanalyse einer möglichen kreislaufgerechten ressourcenschonenden Bauwirtschaft

Die durchgeführten Interviews wurden mittels der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach [May 2019] ausgewertet (vgl. Abschnitt 3.2.0). Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Anhang A_5 enthalten. Die genannten Hindernisse und Barrieren wurden hierbei den vier Arten von Barrieren der Kreislaufwirtschaft nach [Kir2018] – rechtlich/regulatorisch, gesellschaftlich, technisch und ökonomisch/marktbedingt – zugeordnet und in Unterkategorien eingeteilt. Es wird deutlich, dass ein Großteil der vorrangig genannten Hindernisse und Barrieren den Unterkategorien „Ausschreibungen/Planungen“, „Sortenreine Trennung von Abfallströmen“ und „Nachfrage/Preis“ zuzuordnen sind. Die Hindernisse und Barrieren, welche am häufigsten zur Beantwortung der Fragestellung „Was sind die derzeitigen Barrieren und Hindernisse, die hochwertigem Recycling und/oder der Wiederverwendung von Bauprodukten im Wege stehen?“ genannt wurden, sind hierbei die folgenden:

- Keine Berücksichtigung der Ressourcenschonung in Wertungskriterien von Ausschreibungen
- Qualitätsanforderungen an Baustoffe sind mit Recyclingbaustoffen nicht einhaltbar
- Einsatz von schwer/nicht trennbaren Verbundbaustoffen ermöglichen keine sortenreine Trennung von Abfallströmen
- Keine getrennte Erfassung bzw. keine ausreichende sortenreine Trennung von Abfallströmen
- Preisdruck/Konkurrenz zu Primärrohstoffen und anderen verwertungszweigen

Ein wichtiger Baustein für eine kreislaufgerechte ressourcenschonende Bauwirtschaft ist demnach die sortenreine Trennung von Abfallströmen, sodass weiter von den Materialeigenschaften der einzelnen Baustoffe profitiert werden kann bzw. eine Wieder-/Weiterverwendung oder das Recycling überhaupt erst ermöglicht wird. Weiterhin muss die Wieder-/Weiterverwendung und das Baustoffrecycling wirtschaftlich sein, um sich durchsetzen zu können. Es wurde in den Interviews zudem deutlich, dass die öffentliche Hand eine Vorreiterrolle einnehmen und Anreize schaffen muss, die kreislaufgerechtes und ressourcenschonendes Bauen erleichtern.

Bei der Auswertung der Interviews ist einschränkend zu beachten, dass die Kriterien der Datensättigung nach [Fra2010] bisher nicht erreicht wurden und demnach die Möglichkeit besteht, dass einzelne Hindernisse/Barrieren bisher nicht identifiziert wurden. Zudem wurden vorrangig Akteure aus dem Bereich Aufbereitung interviewt. Insbesondere Akteure, die ausschließlich im Bereich Abbruch tätig sind, hatten kein Interesse an einer Interviewteilnahme. Hierdurch ist eine Verzerrung bei der Relevanz einzelner Hindernisse/Barrieren möglich.

3.2.2 Arbeitspaket 2.2: Narrative einer regionalen Kreislaufwirtschaft: Prototypen zur Untersuchung und Diskussion von Wieder- und Weiterverwendungsprozessen im Bau

Im Fokus des Arbeitspaketes 2.2 steht die Untersuchung und Kommunikation von Narrativen der Kreislaufwirtschaft mit Bezug auf die Themen Wieder- und Weiterverwendung im Bau. Als Mittel der Kommunikation werden verschiedene Re-Use Prototypen konzipiert und im ProtoPotsdam ausgestellt. Diese adressieren ausgewählte Potenziale und Barrieren der Wieder- und Weiterverwendung in Form von konkreten Beispielen. Diese anfassbare Darstellung von Narrativen der Kreislaufwirtschaft stellt einen Anstoßpunkt für diese notwendigen Diskussion und den interdisziplinären Austausch über Problemstellungen dar. Dieser Austausch soll zudem das Verständnis darüber fördern, was sich im Detail hinter der Diskussion über große Massenströme verbirgt. Nachdem im Arbeitspaket 2.1 die Betrachtung von Abfallströmen auf einer Makroebene erfolgt ist, ermöglicht das Arbeitspaket 2.2 die genaue Betrachtung einiger konkreter Reststoffe auf einer Mikroebene. Dies unterstützt das Verständnis darüber, was im Einzelnen unter den diskutierten Abfallschlüsseln zu erwarten ist. Die betrachteten Prototypen lassen sich dabei den Stoffströmen Holz, Flachglas und Beton/Bauschutt zuordnen. Die Entwicklung und Gestaltung der Prototypen erfolgt durch Re-Use Experten aus dem „Haus der Materialisierung“.

Das „Haus der Materialisierung“ (HdM) ist ein urbanes Reallabor am Berliner Alexanderplatz. Das HdM wurde 2019 mit dem Ziel gegründet, die sozial-ökologische Transformation der Stadtgesellschaft zu unterstützen. Das HdM ist ein multidisziplinäres Zentrum für klimaschonende Ressourcennutzung, welches durch zahlreiche Maßnahmen die Ressourceninanspruchnahme und das Abfallaufkommen der Stadt Berlin reduzieren will. Diese Maßnahmen umfassen Sharing-, Re-Use-, Repairing-, Upcycling- und Reskilling/Wissenstransfer-Konzepte. Als Teil der experimentellen Quartiersentwicklung im „Haus der Statistik“ konnte ein leerstehender Flachbau reaktiviert und schrittweise mit 26 Organisationen, Initiativen und Einzelpersonen wiederbelebt werden. Die im HdM versammelten Nutzungen vereinigen vielschichtige Expertise und betreiben gemeinsam verschiedene Werkstätten, Gebrauchtmaterialmärkte, Materiallabore, Leih- und Bildungsangebote. Hinzu kommen Kooperationen mit Verwaltung, NGOs, Wirtschaft und Wissenschaft, die in den transdisziplinären Entwicklungsprozess des Zentrums eingebunden sind. Die in Tabelle 3 dargestellten Organisationen aus dem HdM haben jeweils die Entwicklung eines Prototyps durchgeführt. Die entwickelten Prototypen stellen Beispiele für die Wieder- und Weiterverwendung von Reststoffen als Bauprodukte dar.

Tabelle 3: Darstellung von beteiligten Initiativen aus dem HdM inklusive der entwickelten prototypischen Anwendungen

Nr.	Initiative:	Prototypische Anwendung:	Webseite:
1	BAUFACHFRAU Berlin e.V.	Innenraumtrennwände mit Regalfunktion	https://www.baufachfrau-berlin.de/
2	Kunst-Stoffe e.V.	Statische Fenstermodule/ Glaswände	https://kunst-stoffe-berlin.de/
3	Material Mafia	Al- PE Boxen, Wandpanele	https://www.material-mafia.net/
4	Mitkunstzentrale e.V.	Künstlerische Geopolymer Beton Elemente	https://www.mitkunstzentrale.de/
5		Künstlerische Mycel-Altholz Verbundstoffe	

Parallel zu der Entwicklung der Prototypen erfolgt die Erforschung der Wieder- und Weiterverwendungsprozesse. Zielstellung ist es, die Prototypen zu systematisieren und für kommunikative Zwecke aufzubereiten. Dabei steht das interdisziplinäre Prozessverständnis im Vordergrund. Um dies zu erreichen werden deskriptive Methoden aus Kreislaufwirtschaft, Bauwesen und der Ökobilanzierung angewendet. Im Ergebnis entsteht ein Ansatz zur interdisziplinären und umweltbezogenen Untersuchung von Wieder- und Weiterverwendungsprozessen im Bausektor. Zentral sind die Fragen: Welche Methoden eignen sich, um stattfindende Prozesse darzustellen? Welche Funktion kann durch die Weiterverwendung von lokal verfügbaren Reststoffen erfüllt werden? Welche Barrieren und Hindernisse existieren? Welcher Beitrag entsteht dadurch an einer nachhaltigen Bauweise? Von der Untersuchung werden Charakteristiken und relevante Faktoren abgeleitet. Die Erkenntnisse werden in einem Charakterisierungsmodell für Wieder- und Weiterverwendung im

Bausektor mit einer vereinfachten Darstellung von materialbezogenen Umweltwirkungen zusammengefasst.

3.2.1 Methodischer Ansatz

Die europäische Abfallhierarchie stellt ein zentrales Konzept zur Beurteilung der Hochwertigkeit verschiedener abfallwirtschaftlicher Maßnahmen dar. Auf den obersten Hierarchieebenen sind die Abfallvermeidung inklusive der Wiederverwendung und die Vorbereitung zur Wiederverwendung angeordnet. Ziel beider Ansätze ist es, die Nutzungsdauer von Produkten oder Materialien hochwertig zu verlängern und zu verhindern, dass diese als Abfall mit minderwertigen Maßnahmen behandelt werden. Dadurch entstehen weniger Abfälle und negative Umweltwirkungen werden reduziert. Die Prototypen sind Beispiele für die Wieder- und Weiterverwendung. Die Abfallvermeidung in Form der Wiederverwendung von Erzeugnissen und Nebenprodukten ohne Abfalleigenschaft und die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfällen können somit als hochwertige Maßnahmen der europäischen Abfallhierarchie zur nachhaltigen Transformation des Bausektors beitragen. Bauprodukte, deren Herstellung in der Vergangenheit Emissionen verursacht hat, werden wiederverwendet wodurch Primärrohstoffe substituiert und für die Herstellung dieser notwendige Emissionen vermieden werden. Beispiele hierfür sind die Wiederverwendung von Gebäudekomplexen, [Cha2022] und die Wiederverwendung von einzelnen Bauelementen [Küp2022]. Die Transformationsstrategien der Prototypen sind in Abbildung 14 dargestellt.

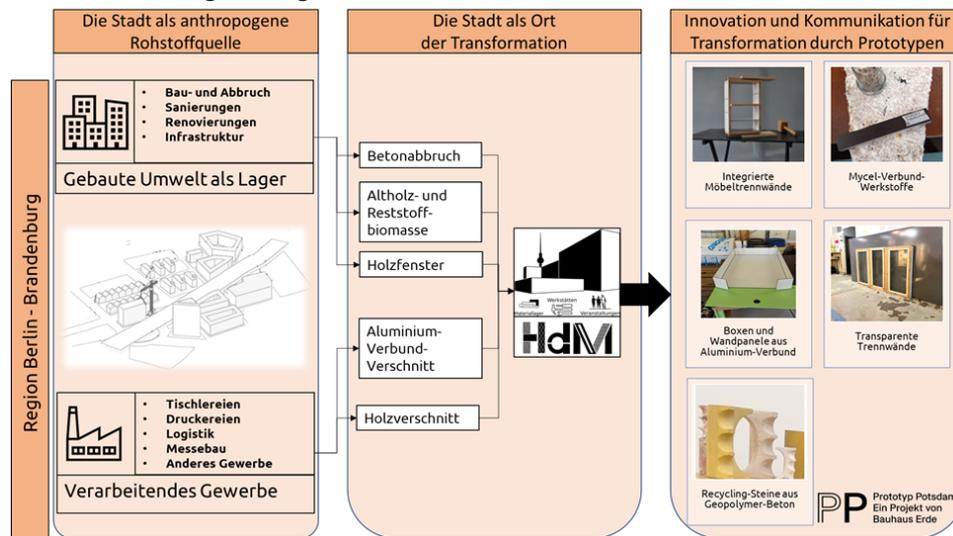


Abbildung 14: Transformationsstrategien der Prototypen

Die Abfallhierarchie als grundlegendes Konzept definiert somit zentrale und rechtlich relevante Begriffe, welche in anderen Disziplinen nicht präsent sind. In vielen Fällen wird lediglich der Begriff Re-Use verwendet, welcher aber unterschiedlich definierte Maßnahmen wie die Vermeidung, die Wiederverwendung, die Weiterverwendung, die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder das Recycling umfassen kann. Die konkrete rechtliche Einordnung hängt von mehreren Faktoren ab. Informationen über das Inputmaterial in den Wiederverwendungsprozess erlauben nicht nur die Einordnung auf der europäischen Abfallhierarchie als Vermeidung oder Vorbereitung zur Wiederverwendung, sondern geben auch neue Ansätze, um stattfindende Prozesse messbar zu machen und damit auch die Relevanz der Wiederverwendung darzustellen. Die beschriebene Einordnung nach der europäischen Abfallhierarchie basiert auf der Perspektive der Kreislaufwirtschaft. Wichtig ist es jedoch die Wieder- und Weiterverwendungsprozesse so zu beschreiben, dass die Perspektiven anderer beteiligter Stakeholder ebenfalls integriert werden, um das interdisziplinäre Verständnis zu ermöglichen. Für diese interdisziplinäre Charakterisierung der Prototypen wird der Prozess der Wiederverwendung in die separaten Bestandteile Input, Wiederverwendungsprozess und Output unterteilt. Da sich durch die Wiederverwendung relevante Eigenschaften eines Bauproduktes wie z.B. die Funktion oder die Zusammensetzung ändern können, erlaubt die separate Betrachtung diese Veränderungen zwischen Input und Output transparent darzustellen.

3.2.2.1.1 Charakterisierung von Wiederverwendungsprozessen

Die Charakterisierung der Wiederverwendungsprozesse basiert auf einer dreigeteilten Struktur basierend auf der separaten Betrachtung von **Input**, **Wiederverwendungsprozess** und **Output**. Relevant sind Aspekte wie z.B. *Die Herkunft und Qualität*. Und spezifische Informationen wie z.B. der *"Typ Herkunft"*.

3.2.2.1.1.1 Input Charakterisierung

<p>Input Kategorisierung nach Bauprodukten:</p>	<p>Der Input wird nach den Produktkategorien der ÖKOBAUDAT kategorisiert, wodurch die Anschlussfähigkeit and das Bauwesen hergestellt wird [Fig2019]. . Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbank von Umweltproduktdeklarationen (EPD) von Baustoffen und Bauprodukten. Dafür stehen 432 Einzelkategorien in der ÖKOBAUDAT zur Verfügung</p>
<p>Herkunft und Qualität:</p>	<p>Die Beschreibung der Herkunft und Qualität des Inputs basiert auf Informationen aus Fragebögen und Interviews. Es werden zudem Informationen über die Homogenität und eine potenzielle Kontamination des Inputs erfasst und bewertet.</p>
<p>Abfallwirtschaftliche Einordnung:</p>	<p>In der ÖKOBAUDAT gelistete EPDs enthalten u.a. Ökobilanzdaten, welche den Bauprodukten entlang von Lebenswegmodulen nach EN 15804 zugeordnet werden. Diese Lebenswegmodule bilden die relevanten Lebensphasen eines Bauproduktes von der Herstellung (Module: A1 - A5), über die Nutzung (Module: B1 - B5) bis hin zur Entsorgung (Module: C1 - C4) ab. Anhand der Lebensphasen wird es möglich, die Emissionen eines Bauproduktes einer konkreten Phase (z.B. der Herstellung in A3) zuzuordnen. Diese Lebenswegmodule werden im entwickelten Charakterisierungsmodell zur abfallwirtschaftlichen Einordnung der Wiederverwendung genutzt. Die Einordnung basiert auf den gesammelten Informationen über die Herkunft und die Qualität des Inputs. Mit diesen lässt sich bewerten, ob es sich bei dem Input um ein handelbares Produkt, ein Nebenprodukt oder um einen Abfall nach KrWG handelt. Die Wiederverwendung eines Produktes oder Nebenproduktes begründet die Zuordnung zur Vermeidung. Liegt die Abfalleigenschaft vor, muss durch die Vorbereitung zur Wiederverwendung das Ende der Abfalleigenschaft herbeigeführt werden. Anhand der beschriebenen Lebenswegmodule nach EN 15804 wird der reguläre Eintritt der Abfalleigenschaft eines Produktes lokalisiert und visualisiert. Z.B. entsteht entlang des Lebensweges einer Holztür im Modul A3 "Herstellung" Holzverschnitt als Abfall. Dieser Verschnitt kann als Nebenprodukt den Input für eine Wiederverwendung darstellen, wodurch es sich um die Vermeidung handelt.</p>
<p>Embodied Carbon:</p>	<p>Zur vereinfachten Darstellung von Umweltwirkungen der Wiederverwendung wird der Indikator <i>Embodied Carbon</i> (EC) genutzt. Der Indikator wird häufig im Kontext der Bewertung von Bauprodukten verwendet und stellt die freigesetzten Emissionen eines Bauproduktes entlang der Herstellung in kg CO₂ Äquivalentemissionen pro kg Material dar (cradle-to-gate). Mit der "Inventory of Carbon and Energy Database" (ICE Database) (https://circularecology.com/) steht eine umfangreiche Datenbank für EC von Bauprodukten zur Verfügung. Die ICE Database fasst Daten aus europäischen EPD-Datenblättern zusammen und bildet diese als EC von Bauprodukten ab [Circular Ecology 2019]. Zudem wird die Speicherung von Kohlenstoff im Material berücksichtigt. Die im Input verwendeten Materialien werden aus der ICE Database extrahiert und abgebildet. Im Fall von Verbundprodukten werden die Massenanteile der Hauptmaterialien berücksichtigt.</p>

3.2.2.1.1.2 Wiederverwendungsprozess

Prozessübersicht:	Die Betrachtung des praktischen Wiederverwendungsprozesses ermöglicht das Verständnis der einzelnen Prozessschritte. Die Prozessübersicht listet benötigte Hilfsstoffe, entstandene Reststoffe und verwendete Maschinen im Rahmen des Wiederverwendungsprozesses.
Prozessschritte:	Um den Wiederverwendungsprozess transparent darzustellen werden die einzelnen Prozessschritte aufgelistet und in Form von einfachen Fließbildern dargestellt. Dadurch wird es möglich den Input über den Wiederverwendungsprozess hinweg zu verfolgen.
Prozessparameter:	Informationen über die Arbeitszeit und Prozessemissionen haben einen Einfluss auf die Umweltbewertung, die Wirtschaftlichkeit und die Skalierbarkeit der Wiederverwendung. Diese Informationen werden in Form von Prozessparametern erfasst und dargestellt.

3.2.2.1.1.3 Output Charakterisierung

Output Kategorisierung nach Bauprodukten:	Output der Wiederverwendung ist ein Bauprodukt. In erfolgt erneut die Kategorisierung als Bauprodukt um Veränderungen im Nutzungszweck festzustellen.
Objekt Charakterisierung:	Der Output wird präzise beschrieben indem u.a. die Funktion, die Zusammensetzung und das Gewicht angegeben werden.
Entwicklungsstatus und Einflusspotenzial des technologischen Ansatzes:	Die vereinfachte Bewertung der Umweltwirkung basiert auf der Berechnung des EC im Input, welcher in dem Output wiederverwendet wird. Hierfür ist die Masse des Inputmaterials notwendig, welches für den Wiederverwendungsprozess genutzt wird. Hilfsstoffe und Energieverbrauch werden nicht berücksichtigt.

3.2.2.1.2 Kommunikation von Ergebnissen mittels Etiketten

Die Kommunikation von Forschungsergebnissen und von Erkenntnissen aus der Untersuchung der Prototypen wird mittels Etiketten kommuniziert. Um im Narrativ der Prototypen und der Kreislaufwirtschaft zu bleiben wird die Verwendung von Flügelfenstern als Etikett vorgeschlagen. Diese sollten über individuell bewegbare und faltbare Fensterflügel verfügen. Dadurch wird es möglich die Fensterflügel von innen und von außen mit Inhalten auszustatten. Die Fenster sollen den Besuchern „Einblicke“ in das zirkuläre Bauen in Form der Prototypen verschaffen. Das interaktive Design der Etiketten soll zudem die Neugier der Besucher wecken und diese zur Interaktion mit den Etiketten anregen. Zudem wäre es möglich reale und anfassbare Fenster aus dem Haus der Materialisierung als Etikett zu nutzen.

Die Etiketten klären in vier Bereichen kurz und prägnant über die folgenden Aspekte der Prototypen auf:

- Herkunft und Art des Materials
- Problemstellung und Potenzial des Abfallstroms
- Was wird getestet?
- Was können wir lernen?

3.2.2.2 Ergebnisse

Als Ergebnis werden die untersuchten Prototypen vorgestellt und mittels des entwickelten Etikettes präsentiert. Die vorgestellten Ergebnisse ergänzen die eingereichten Dokumentationen der Materialinitiativen aus dem Haus der Materialisierung. Teilweise wurden hierfür Textbausteine aus den Dokumentationen übernommen. Zusätzlich erfolgt eine detaillierte tabellarische Auflistung von Informationen über die Prototypen im Anhang A_15. Die Dokumentationen der Materialinitiativen sind im Anhang A_15, A_16, A_17, A_18 und A_19 aufgeführt. Anschließend erfolgt eine Darstellung von

Erkenntnissen, welche aus der Untersuchung der Prototypen resultieren. In Anhang A_20 sind die Etiketten zur Kommunikation der Ergebnisse beigefügt.

3.2.2.1 Darstellung von Prototypen

3.2.2.1.1 Innenraumtrennwände mit Regalfunktion

Bei Zuschnittprozessen im Rahmen der Herstellung von Möbeln oder anderen Objekten aus Holz entstehen Verschnitte in unterschiedlichen Farben, Formaten und Stärken. Aufgrund der Schwierigkeit Verschnitte direkt in eine weitere Nutzung zu bringen, werden diese oft als Abfall entsorgt. Größere Verschnitte werden teilweise zwischengelagert, bis sich eine geeignete Anwendungsgelegenheit bietet, jedoch erfordert dies kostenintensiven Lagerkapazitäten sowie Personal zur Wartung und Verwaltung. Es besteht hierbei eine Abhängigkeit zum Preis der Neuware. Ist die Lagerung oder Weiternutzung unwirtschaftlich werden Verschnitte als Altholz entsorgt, obwohl diese oft keinerlei Qualitätsbeeinträchtigungen aufweisen. Im Raum Berlin/ Brandenburg entstehen Verschnitte in kleinen und mittelständischen Tischlereien und Holzverarbeitenden Betrieben. Es handelt sich dabei um ein Nebenprodukt aus der Herstellung von Möbeln oder Bauprodukten.

Die prototypische Anwendung von Verschnitten sieht die Entwicklung und Herstellung eines Prototyps aus Restholz für 3 Raummodule als funktionale, nichttragende Innen- und Trennwandelemente vor. Dafür werden laufend anfallende Produktionsreste wie Streifen und stückige Reste in Standardmaterialstärken verwendet. Die Auswahl an Holzwerkstoffen beschränkt sich auf Furnierschichtholzplatten, sodass alle Schnittkanten ein einheitliches Bild ergeben. Oberflächen werden passend nach Typ und Farbe kombiniert. Alle Elemente werden rückbaubar gestaltet. Einzig die Boden- und Deckenschienen müssen aus Gründen der Stabilität baulich verankert werden. Die Holzverbindungen des Rahmens sind in den Eckbereichen Nut- und Federverbindungen. Über gefalzte Verbindungen entstehen seitliche Auflager für z.B. Regalböden oder horizontale Falze für die Aufnahme der Rückwandplatten. Vor Ort werden Boden- und Deckenschienen montiert und die entsprechenden Raumelemente additiv aufgereiht und gesichert. Der Rückbau erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

3.2.2.1.2 Statische Fenstermodule/ Glaswände aus ausgebauten Holz-Flügelfenster

Bei der Sanierung oder dem Abbruch von Bauwerken werden Fenster oft früher als notwendig entsorgt. Recycling kann die gebundenen Ressourcen und Energie nur teilweise kompensieren. Ausbau und Recycling von Fenstern stehen meist im Zusammenhang mit der energetischen Sanierung von Bauwerken. Oftmals werden auch Fenster ausgetauscht, die der Energieeinsparverordnung genügen. Für einen geringfügig besseren Wärmedurchgangswert werden gut erhaltene Fenster ausgebaut und entsorgt.

Die Hauptbestandteile von Holzfenstern mehrere Lagen von Flachglas und ein Holzrahmen. Das Team von Kunst-Stoffe e.V. hat ein modulares Bauteil auf der Basis von Altfensterflügeln aus Holz entwickelt. Beim Ausbau werden diese meist ausgehängt und bleiben intakt. Die Maße eines Flügels liegen häufig zwischen 90-150cm Höhe und 60-110cm Breite. Für die Herstellung der Module werden die Flügelfenster von ihren Beschlägen befreit auf eine ebene Fläche reduziert. Anschließend wird der Fensterrahmen mit einer angepassten Außenlattung versehen, so dass es eine einheitliche Größe und Rahmung entsteht. Die Außenmaße orientieren sich am „Baurichtmaß“, einer etablierte Normgröße im Bau. Am Baurichtmaß orientieren sich wiederum andere Bauteile wie Fassadenelemente, Fenster- und Türrahmen wodurch eine Passgenauigkeit in der Praxis gegeben ist. Die Rahmen werden an den Innenseiten mit Bohrungen und Schrauben ausgestattet, um die Verbindung mit weiteren Modulen zu ermöglichen.

Der Prototyp erlaubt die Weiternutzung von Flügelfenstern unter Nutzung der bisherigen Materialeigenschaften. Die neu entwickelte einheitliche Rahmung ermöglicht den Umgang mit flexiblen Flügelfenstergrößen. Die Fenstermodule lassen sich vertikal und horizontal über mehrere Meter aneinandersetzen, so dass Wände oder Fassaden daraus montiert werden können. Durch die größere Fläche der Rahmenhölzer (im Vergleich zu den dünneren ursprünglichen Fensterrahmen) und die Vielzahl an Verbindungsschrauben wird eine hohe Stabilität und Versteifung der Wand erreicht. Diese muss in ein Trägersystem des Baukörpers eingebaut werden, da sie keine statische Funktion für das Gebäude hat.

Im Falle eines Schadens, zum Beispiel Glasbruch, lässt sich ein komplettes Modul ohne großen Aufwand auch aus der Mitte einer Wand herausnehmen und gegen ein neues mit identischen Außenmaßen ersetzen.

3.2.2.1.3 Boxen und Wandverkleidungen aus Verschnitt von Aluminium-Verbundplatten

Eine Aluminium-Verbundplatte ist ein Verbundmaterial aus zwei außenliegenden Aluminium-Blechen und einem leichten Kern aus Kunststoff (z.B. Polyethylen). Diese Zusammensetzung stattet das Material mit Materialeigenschaften wie z.B. hoher Biegsamkeit, geringem Gewicht und Temperatur- und Wetterbeständigkeit aus. Im Verhältnis zu reinem Aluminium ist das Material günstiger und deswegen nachgefragt. Diese Materialeigenschaften machen Al-Verbundplatten zu einem beliebten Werkstoff in der Werbeindustrie, der Architektur, dem Bauwesen sowie für das Transportwesen. Das Material wird als Plattenware ausgeliefert und erfordert den Zuschnitt für den jeweiligen Anwendungsfall. Beim Zuschnitt fallen Verschnitte an, welche üblicherweise als Abfall entsorgt werden. Die Verschnitte entstehen in unterschiedlichen Formen, Stärken und mit verschiedenen Oberflächen. Einschränkungen in der Qualität entstehen dabei oftmals nicht. Aufgrund von fehlenden Lagerkapazitäten oder Anwendungskonzepten erfolgt die Entsorgung als Gewerbeabfall oder Aluminium-Schrott.

Die Zusammensetzung der Verbundplatte macht diese herausfordernd für das Recycling. Zwar existieren spezifische herstellerbetriebene Rücknahmesysteme mit spezifischen Recyclingverfahren für das Material, jedoch ist unbekannt welche Mengen darüber erfasst werden. Für das Recycling des Aluminiums ist der Anteil an Aluminium zu gering und der Heizwert des Kunststoffkernes zu hoch. Es ist deswegen zu erwarten, dass die thermische Verwertung das typische End of Life Szenario darstellt. Die prototypische Anwendung beschreibt die Weiterverwendung von Aluminium- Verbundplatten als Inputmaterial für die Herstellung von Boxen sowie die Nutzung als Wandverkleidung. Im Rahmen der Weiterverwendung erfolgt eine Qualitätskontrolle und die Auswahl passender Verschnitte. Das Material wird mit einer Kreissäge passend für den Anwendungsfall zugeschnitten. Mittels einer speziellen Plattenfräse werden Faltkanten in das Material eingefräst. Durch die Faltkanten kann das Material im rechten Winkel zu Boxen gefaltet werden. Mittels Nieten werden die Boxen fixiert und in Form gehalten. Im Anschluss sind die Boxen Bereit für die Nutzung. Als Innenwandverkleidung kann das Material direkt weiterverwendet werden. Der Einsatzzweck ist damit sehr nah an dem Verwendungszweck der Neuware.

3.2.2.1.4 Künstlerische Geopolymer Elemente aus Betonabbruch vom Haus der Statistik

Im Zuge von Sanierungs- und Abbrucharbeiten entstehen große Mengen Betonabbruch und anderer mineralischer Abbruchabfälle. Bei der Sanierung des Haus der Statistik wird das Gebäude aus den 70iger Jahren umfangreich saniert wobei große Mengen Betonabbruch, Estrich, Zementbausteine und ähnliche mineralische Abfälle anfallen. Der Prototyp thematisiert den entstehenden Betonabbruch, welcher in Form von Gesteinskörnung im Rahmen der Herstellung von Geopolymerbeton wiedergenutzt werden soll. Passende Bruchstücke von der Baustelle des Hauses der Statistik werden für die Weiterverwendung als Gesteinskörnung ausgewählt. Dabei gilt es zu beachten, dass andere mineralische Baustoffe (Glas, Estrich, Ziegel etc.) und potenziell mit Asbest oder anderen Schadstoffen belastete Bestandteile identifiziert und entfernt werden. Das Material wird zerkleinert und mittels eines Siebes in Gesteinskörnung und Recycling-Sand separiert. Die Gesteinskörnung sollte in etwa Abmessungen von 5cm³ entsprechen.

Im Zentrum des Wiederverwendungsprozesses steht die Idee Treibhausgasintensiven Zement durch alternative Bindemittel zu ersetzen und somit klimafreundliche Betonkörper herzustellen. Als Bindemittel fungiert das Geopolymer. Geopolymere sind anorganische Bindemittel wie z.B. Tone, Flugaschen oder natürliche Vulkangesteine, welche alkalisch aktiviert werden und dadurch bindende Eigenschaften erhalten. Für die Herstellung des Prototyps wird eine fertige Geopolymere Mischung verwendet, der „Environmental Friendly Concrete Activator“ (EFC Activator). Die fertige Mischung enthält alle Bestandteile, welche zur Herstellung eines Geopolymer basierten Betonkörpers notwendig sind. Gesteinskörnung, Geopolymer Mischung und Wasser werden gemischt und als künstlerische Komponente werden farbige Pigmente hinzugefügt. Parallel werden aus Sperrholz Formen für den Guss

des Betons hergestellt. Über einen Zeitraum von etwa 24 – 48 Stunden härtet der Beton in der Gussform aus. Nachdem die Gussform entfernt wurde, kann der Betonkörper verwendet und ausgestellt werden. Vorherige Experimente und Anwendungsfälle haben gezeigt, dass sich die Technologie vielfältig und in ähnlichen Szenarien wie Beton einsetzen lässt. Der Prototyp stellt künstlerisch die Möglichkeiten des Einsatzes von Geopolymer basierten Bindemitteln dar. Indem Geopolymere und Gesteinskörnung lokal bezogen werden können, wird die lokale Produktion und Kreislaufführung von Baustoffen ermöglicht. Von besonderer Bedeutung hierfür ist die Möglichkeit der recycelte Gesteinskörnung einzusetzen und der Verzicht auf Zement als Bindemittel.

3.2.2.1.5 Künstlerische Darstellung von Mycel-Altholz Verbundstoffen

Mycel ist das Wurzelwerk von Pilzen. Die bekannten Fruchtkörper der Pilze, erscheinen oberirdisch und sind nur ein Teil des gesamten Pilzes. Das unterirdische Mycel bildet den Großteil des Organismus. Das Mycel besteht aus zahlreichen verzweigten Hyphen. Der Durchmesser der Hyphen beträgt 2 bis 20 Mikrometer. Einige Pilze sind auf die Nutzung von Hölzern und Lignin reicher Biomasse als Substrat spezialisiert– genannt wird die Symbiose Mykorrhiza.

Das Mycel verschiedener Pilzarten ist in der Lage, mittels der Hyphen, zerkleinerte Biomasse zu einem formstabilen Verbundmaterial mit potenzialreichen Materialeigenschaften zu verbinden. Für holzeretzende Pilze kommen verschiedene Biomassen als Substrat in Frage.

Ausgangsmaterialien und Substrat für das Pilzwachstum sind verschiedene Althölzer und Biomassen aus der Metropolregion Berlin Brandenburg. Abhängig von dem gezüchteten Pilz werden Anforderungen an die Biomasse gestellt. Relevant sind verschiedene chemische und biologische Parameter, wie z.B. der Lignin- und Cellulose Gehalt, verwendete Fungizide oder Lacke. Da es sich hierbei um einen neuen technologischen Ansatz handelt, wird aktuell noch stark experimentiert, welche Pilze sich für welches Substrat gut eignen und welche Anwendungsmöglichkeiten die entstehenden Verbundstoffe mit sich bringen. Im besonderen Fokus der Untersuchung steht die Nutzung von Holzwerkstoffen und Rinde als Substrat. Wichtig dabei ist, dass es sich hierbei um die letzten Reste von Wertschöpfungsketten handelt. Der Prototyp ist eine künstlerische Installation, entwickelt als „Kunst am Bau“, die während der Bauphase des Pavillons in Absprache mit dem Design Team umgesetzt wird. Die Installation besteht aus Mycel-basierten Kompositen. Die Rinde der Bäume, welche für die Konstruktion des Pavillons gefällt werden, soll das Substrat werden, welches mithilfe des Myzels zu einem Komposit verbunden wird.

3.2.2.2 Erkenntnisse aus der Untersuchung von Prototypen

Die entstandenen Prototypen sind greifbare Beispiele für die untersuchte Abfallströme. Die Prototypen unterscheiden sich in ihren Konzepten der Skalierbarkeit, des Entwicklungsstatus, Zielkonflikte und Barrieren der Kreislaufwirtschaft. In den folgenden Paragraphen werden diese Erkenntnisse dargestellt und diskutiert.

3.2.2.2.1 Skalierbarkeit

Die Skalierbarkeit der verschiedenen Ansätze ist jeweils stark von dem erforderlichen Maß an Handarbeit, der Möglichkeit der Automatisierung von Prozessen und der Materialverfügbarkeit abhängig. Aktuell setzen alle Ansätze auf ein hohes Maß an Handarbeit wodurch diese kostenintensiv in der Herstellung sind. Durch die Weiterentwicklung der Herstellungsprozesse sind hier aber große Potenziale der Effizienzsteigerung denkbar. Verschiedene Designentscheidungen, wie beispielsweise die Normierung der Fenstergrößen, zielen auf den Umgang mit Inhomogenität im Input und die Automatisierbarkeit und Skalierbarkeit der Ansätze ab. Trotzdem wird weiterhin, durch die notwendige Handarbeit und die aufwändige Qualitätskontrolle des Inputs, hoher wirtschaftlicher Druck gegenüber im Nutzungszweck vergleichbarer Neuware bestehen bleiben. Dies hat Auswirkungen auf die Nachfrage und damit auch auf die Skalierbarkeit. Bei allen Reststoffen ist davon auszugehen, dass im Raum Berlin Brandenburg ausreichend Material für die Skalierung auf mittelgroße Stückzahlen vorhanden ist. Darüber hinaus gilt es Daten über konkrete Verfügbarkeiten passender Inputmaterialien inklusive potenzieller Quellen zu prüfen. Dies gilt insbesondere für verarbeitende Betriebe von Furnierschichtholz und Aluminium-Verbundplatten. Diese notwendigen Informationen für die Einschätzung der Skalierbarkeit liegen nicht vor. Im Falle von Holzflügelfenstern gilt es ebenfalls die konkrete Verfügbarkeit zu prüfen, da die Qualität

relevant ist. Im Allgemeinen kann aber durch Sanierungen und Renovierungen von einer großen Verfügbarkeit von Fenstern ausgegangen werden. Sowohl Altholz als auch Betonabbruch sind Massenabfälle, welche in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen könnten, wobei hier auch Einschränkungen in der Qualität auftreten können. Für beide Abfallströme gilt es, den Prozess weiterzuentwickeln damit eine Skalierbarkeit potenziell möglich erscheint.

3.2.2.2.2 Entwicklungsstatus

Alle untersuchten Anwendungen befinden sich im Status von Prototypen und erfordern weitere Entwicklungsschritte, Tests und Anpassungen bis zum ausgereiften Produkt. Die Prototypen müssen in voller Größe angefertigt und eingebaut werden. Bei der Anfertigung der gewünschten Anzahl von Prototypen in den erforderlichen Abmessungen könnten Probleme auftreten. Zudem müssen sich die Prototypen langfristig bewähren und die Funktionalität, Wetterbeständigkeit, Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Rückbaubarkeit beweisen.

Im Falle von Mycelverbundstoffe und Geopolymer Beton werden zwei Ansätze verwendet, welche sich aktuell international in der Entwicklung befinden. Verschiedene Organisation forschen an neuen optimierten Herstellungsverfahren und Anwendungsfällen. Mit diesem großen Interesse und der hohen Anzahl an Akteuren sind Fortschritte in den Technologien möglich.

3.2.2.2.3 Zielkonflikte

Zielkonflikte können beim Zugriff auf die Materialien auftreten. Gerade im Kontext der geplanten Dekarbonisierung besteht eine Nachfrage nach Biomasse und nachwachsenden Brennstoffen für die Energiegewinnung. Oftmals wird somit die energetische Verwertung von Altholz der Weiterverwendung vorgezogen wird. Dagegen sind Abfallfraktionen wie Aluminium-Verbundplatten werthaltig und kostenintensiv in der Abfallbehandlung. Dies macht sich auch in dem Preis für die getrennt Erfassung von Reststofffraktionen für den Abfallerzeuger bemerkbar. Im Resultat kann bei höherer Nachfrage nach den Reststoffen ein positiver oder negativer Marktwert entstehen. Da die Abfallwirtschaft ebenfalls von Angebot und Nachfrage geleitet ist, entscheidet dieser Markt über eventuelle Preise und die Verfügbarkeit der Materialien für die Weiterverwendung.

3.2.2.2.4 Vertiefte Hindernis- und Barrierenanalyse auf Ebene der Prototypen

Die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft im Ganzen, aber auch verschiedener Teilstrategien wie z.B. die Weiterverwendung von Reststoffen ist mit verschiedenen Barrieren und Hindernissen konfrontiert. Diese Barrieren verhindern auf mehreren Ebenen die Implementierung von Strategien und können auf zahlreiche Aspekte und Hintergründe rückgeführt werden. Die in Abschnitt 0 dargestellten Barrieren lassen sich dabei in wirtschaftliche, technische, regulatorische und gesellschaftliche Barrieren unterteilen [Kir2018]. Diese Unterteilung wird zur Darstellung von Barrieren im Kontext mit der Herstellung von Prototypen genutzt.

Rechtliche und regulatorische Barrieren: Der Baubereich ist ein stark regulierter. Da langfristig beständige Bauwerke errichtet werden sollen, ist diese Sorgfalt berechtigt, jedoch erschwert dies maßgeblich die Weiterverwendung von Reststoffen als Bauprodukt. Da in vielen Fällen lediglich geprüftes und zertifiziertes Baumaterial verwendet werden kann, wird die Weiterverwendung von Material aus dem Bestand ausgeschlossen. Entsprechende Zertifikate liegen oftmals nicht vor, sind kostenintensiv in der Anfertigung oder die Verwendung wird von Bauherren ausgeschlossen. Da dem Material zudem die Dokumentation des Herstellers fehlt, kann oftmals nicht der ordnungsgemäße Einbau garantiert werden. Damit ist zu begründen, dass die entwickelten prototypischen Anwendungen alle für nicht regulierte Anwendungsfälle konzipiert wurden und keine statischen, energetischen oder sicherheitsrelevanten Funktionen übernehmen.

Gesellschaftliche Barrieren: Eine relevante gesellschaftliche Barriere wird in der Akzeptanz der Anwendungen und dem Vertrauen in das Material gesehen. Da es sich bei den Inputmaterialien um Reststoffe handelt, kann es zu Beeinträchtigungen der Homogenität in der Farbe, der Stärke, des Alters oder der Oberfläche des Materials kommen. Diese möglichen Inhomogenitäten müssen vom Abnehmer

akzeptiert oder toleriert werden. Zudem muss das Bauprodukt das notwendige Vertrauen erzeugen, so dass im Zweifel die Wahl nicht auf das Neuprodukt fällt. Dies würde sich durch Zertifikate oder ähnliches verbessern lassen. Zudem muss im Allgemeinen das Vertrauen in die Weiterverwendung und die Verwendung von Sekundärmaterialien erhöht werden. Dabei ist die Verwendung von Mycel-basierten Baustoffen abstrakter und gewöhnungsbedürftiger als die Verwendung von Verschnitten.

Technische Barrieren: Die entwickelten Prototypen müssen zunächst beweisen, dass diese den technischen Ansprüchen der Nutzungszwecke genügen. Dies lässt sich durch Tests und Qualitätskontrollen erreichen. Dafür müssen diese jedoch zunächst in voller Größe hergestellt und in den Pavillon eingebaut werden. Erst damit kann bewiesen werden, dass die Weiterverwendungsprozesse dazu in der Lage sind, qualitativ hochwertige Bauprodukte zu produzieren. Um Prozesse in der Herstellung und in der Nutzung zu optimieren müssten aber größere Stückzahlen produziert werden. Die Herstellung von Geopolymer Beton und Mycelverbundplatten wird entwickelt und ist technisch nicht ausgereift. Der ProtoPotsdam könnte das notwendige Demonstrationsprojekt werden, um die technische Machbarkeit zu beweisen und weitere Entwicklung in dem Bereich anzuschieben.

Ökonomische und marktbedingte Barrieren: Die Anfertigung und der Verkauf der prototypischen Anwendungen stehen in Konkurrenz mit der Qualität und dem Preis von Neuware. Zwar ist im aktuellen Prozess das Ausgangsmaterial kostenlos, jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass dies auch für größere Massenströme der Fall wäre. Die Qualität des Inputmaterials muss zudem individuell geprüft werden, um ein standardisiertes, risikofreies und hochwertiges Produkt herzustellen. Mit dem Vorhaben marktreife Artikel in größerer Stückzahl zu handeln, könnten zudem höhere Investitionskosten einhergehen.

3.2.3 Zusammenfassung und Diskussion

Obwohl die Recycling- bzw. Verwertungsquoten von einigen, insbesondere mineralischen Baustoffen mit über 75% hoch liegen, ist die Bauwirtschaft jedoch weit von der Vision des zirkulären Bauens entfernt. Durch Recycling werden zwar Primärrohstoffe ersetzt, jedoch werden nur im geringen Umfang Baustoffe ersetzt, die mit hohem Energieaufwand und Umweltwirkungen produziert werden. Insbesondere im Hochbau ist der Wiedereinsatz von Bauteilen und der Einsatz von recycelten Baustoffen gering. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl Potential als auch Ansätze für Wieder-/Weiterverwendung und höherwertiges Recycling bestehen. Aktuelle Hindernisse und Barrieren müssen erkannt und kommuniziert werden, um den Gebäudebestand kreislaufwirtschaftsgerecht umzubauen.

Einige innovative Initiativen wie das „Haus der Materialisierung“ versuchen durch ihre Ansätze hochwertiges Baustoffrecycling und Wieder-/Weiterverwendung zu etablieren. Auch allgemein besteht ein Interesse bei Unternehmen, Kreisläufe zu schließen und wird dem Thema kreislaufgerechtes ressourcenschonendes Bauen eine hohe Relevanz beigemessen. Es existieren zudem bereits diverse digitale Tools, wie N1 [<https://www.myn1.one/>] oder Schüttflix [<https://schuetflix.com/de/de/>], die versuchen, Nachfrage und Angebot an Recyclingbaustoffen besser zu koordinieren. Auch auf rechtlicher Ebene sind in den letzten Jahren verschiedene Regulierungen verabschiedet worden, welche kreislaufgerechtes und ressourcenschonendes Bauen sowie die Vermeidung von CO₂-Emissionen in der Bauwirtschaft fördern sollen. Beispiele sind das das Kreislaufwirtschaftsgesetz, die ab 01.08.2023 geltende Ersatzbaustoffverordnung, der Circular Economy Action Plan oder der Europäische Green Deal [Bra2021].

Durch die Tatsache, dass deutlich weniger Sekundärrohstoffe definierter Qualität zur Verfügung stehen, als Bedarf vorhanden ist, besteht ein großes Potential für das Recycling bzw. die Wieder-/Weiterverwendung von Baumaterialien in Berlin und Brandenburg. Die theoretische Recyclingfähigkeit, welche allein auf dem physischen Vorhandensein von Elementen und Materialien basiert, ist demnach sehr hoch [Rot2023]. Die praktische Recyclingfähigkeit wird jedoch durch diverse Faktoren entlang der Wertschöpfungskette, wie z.B. vorhandene Sammelsysteme und Recyclinginfrastruktur beeinflusst. Das

EoL-Behandlungsszenario beeinflusst maßgeblich die Qualität und Quantität der recycelten Materialien und ist demnach bestimmend für hochwertiges Recycling. Um Kreislaufwirtschaftsfähigkeit zu erreichen, muss ein Produkt recyclingfähig sein. Neben diesem Faktor erfordert Kreislaufwirtschaftsfähigkeit zudem eine langlebige, schadstofffreie, materialeffiziente, reparierbare Gestaltung von Produkten [Hor2020].

Bei einigen Baustoffen existieren materialinhärente Gründe, die die Recyclingfähigkeit und damit eine vollständige Kreislaufwirtschaft erschweren, wie z.B. die Tatsache, dass Beton beim Recycling nicht wieder in seine Bestandteile Zement, Sand und Gesteinskörnung getrennt werden kann, sondern Rezyklate nur als Gesteinskörnung genutzt werden können. Es existieren Ansätze gemahlener zementstein zur Substitution von Klinker zu verwenden, jedoch ist der Anteil, der hier zur Substitution eingesetzt werden kann, beschränkt. Ein vollständig geschlossener Kreislauf ist daher durch Recycling nicht möglich. Für diese Materialien bestehen dennoch Möglichkeiten, Komponenten und Bauteile in äquivalenten Anwendungen wiederzuverwenden. Für die Bewertung muss daher berücksichtigt werden, welche Materialien durch Kreislaufwirtschaft tatsächlich substituiert werden und welche Umweltwirkungen hierdurch eingespart werden.

Neben diesen materialinhärenten Gründen bestehen derzeit auch noch weitere Hindernisse und Barrieren auf dem Weg zu hochwertigem Recycling und/oder der Wiederverwendung von Bauprodukten. Eine große Rolle spielt hierbei, dass Ressourcenschonung in Wertungskriterien von Ausschreibungen keine Berücksichtigung findet. Weiterhin können Qualitätsanforderungen an Baustoffe mit Recyclingbaustoffen nicht immer eingehalten werden und durch Einsatz von schwer/nicht trennbaren Verbundbaustoffen ist eine sortenreine Trennung von Abfallströmen nicht möglich. Weiterhin sind der Preis und die Konkurrenz zu Primärrohstoffen und anderen verwertungszweigen entscheiden dafür, ob ein Bauprodukt recycelt und/oder wiederverwendet wird. Baustoffrecycling ist aufgrund des hohen spezifischen Gewichtes insbesondere der mineralischen Baustoffe ein sehr regionales Geschäft. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Distanzen zwischen Baustelle und Aufbereitung i.d.R. bei max. 100 km liegen. In diesem Sinne trägt Baustoffrecycling zu regionalen Wertschöpfungsketten bei.

Die untersuchten Prototypen verfolgen alle die Absicht im Raum Berlin Brandenburg anfallende Reststoffe durch Wieder- und Weiterverwendungsprozesse in prototypischen Anwendungen als Bauprodukte zu überführen. Damit werden diese Reststoffe als relevanter Inputstrom für zukünftige Bauprojekte thematisiert und diskutiert. Ein Aspekt, welcher dabei noch stärker fokussiert werden müsste, wäre die genaue ökobilanzielle Darstellung von Umweltwirkungen, welche aus der Wiederverwendung resultieren. Dies würde die Anfertigung einer genauen Ökobilanz erfordern und geht über die vereinfachte Darstellung des Embodied Carbon im Input hinaus.

3.2.4 Rechtsquellenverzeichnis

Abfallrahmenrichtlinie – AbfRRL	RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
Abfallstatistikverordnung	VERORDNUNG (EG) Nr. 2150 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. November 2002 zur Abfallstatistik
Altholzverordnung – AltholzV	Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV)
Abfallverzeichnisverordnung – AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)
Entsorgungsfachbetriebeverordnung – EfbV	Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften (Entsorgungsfachbetriebeverordnung - EfbV)

Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV	Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung - ErsatzbaustoffV)
Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV	Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen ¹ (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV)
Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)
Umweltstatistikgesetz – UstatG	Umweltstatistikgesetz (UStatG)

3.3 CO₂-Lebenszyklus (AP 3)

*Autor*innen Kapitel 3.3: Prof. Dr. Galina Churkina (TU Berlin)*

3.3.1. Einleitung

Anstelle einer einseitigen Fokussierung auf CO₂-Emissionen im Gebäudebetrieb ist in Zukunft eine CO₂-Gesamtperspektive entscheidend. Das Arbeitspaket entwickelt Szenarien für maximale CO₂-Reduktions- bzw. Speicherfähigkeit innerhalb einer Lebenszyklusbetrachtung in der Materialquellen, Bauverfahren, intelligenter Betrieb und langfristige Wiederverwendbarkeit systemisch zusammengedacht und mittels CCA (Carbon-Cycle-Assessment) -Methoden [Chu2020] in verschiedenen Szenarien modelliert werden. Auf dieser Basis werden Taxonomien entwickelt, die für die Erstellung des Pavillons und des dauerhaften Gebäudes leitend sein sollen und darüber hinaus einen Diskursbeitrag (regional specific case) für die aktuelle Debatte um Dekarbonisierung bzw. CO₂-Speicherung in Gebäuden liefern.

3.3.2. Erreichung und Abweichungen von den Meilensteinen

Der Pavillon "ProtoPotsdam" wird aus Holz, gepressten Lehmsteinen und wiederverwendeten Materialien gebaut. Das Designteam (AP4) stellte eine vorläufige Liste der Materialien und ihrer Mengen für den Pavillon zur Verfügung. Im Folgenden beschreiben wir die erreichten Meilensteine und erläutern Abweichungen von den ursprünglichen Zielen.

Entwicklung der Szenarien und Vorbereitung der entsprechenden Daten

Folgenden Daten wurden vorbereitet, die für die Bewertung des Kohlenstoffkreislaufs benötigt wurden:

1. Sammlung von Proben von wiederverwendeten Materialien, die für die Gestaltung des Pavillons und seine zukünftige Ausstellung verwendet werden sollen und Analyse der Kohlenstoffgehalte in einem Labor
2. Sammlung Daten für Kohlenstoffemissionskoeffizienten für verschiedene Materialherstellungstechnologien und Kohlenstoffgehalt des Holzes für verschiedene Baumarten aus der Literatur. Entsprechende Daten wurden für Holzwerkstoffe und Lehmsteine gefunden [Ard2022], [Cab2020], [Chr2016], [Mar2018], [Pom 2018]. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Folgenden noch beschrieben.

Die möglichen Optionen (Szenarien) für die Gestaltung des Pavillons, die wir in Betracht gezogen haben, umfassen:

1. Verwendung von Nadelholz bzw. Laubholz beim Bau und deren Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung und -emissionen
2. die Verwendung unterschiedlicher Technologien bei der Herstellung von Holzbauteilen und Lehmsteinen und deren Einfluss auf die Kohlenstoffemissionen

Zu den derzeit noch fehlenden Daten gehören, der Energiebedarf oder die Kohlenstoffemissionskoeffizienten für wiederverwendete Materialien sowie die Dichte von Lehmsteinen. Um den Kohlenstoffgehalt der wiederverwendeten Materialien, die möglicherweise beim Bau des Pavillons oder in der Ausstellung verwendet und in AP 3.2 beschrieben werden zu bestimmen, wurde deren Kohlenstoffgehalt mit einem CNS-Analysator im Chemielabor des Instituts für Ökologie der TU Berlin gemessen.

Der Kohlenstoffgehalt von Materialien auf Biomassebasis (40 - 55 %) ist wesentlich höher als der von Materialien auf Mineralbasis (0,2 - 2 %), siehe auch Abbildung 15. Unter den biomassebasierten Materialien haben alte Fensterrahmen den niedrigsten Kohlenstoffgehalt, während Rinde den höchsten aufweist.

Unter den mineralischen Materialien hat Stein den geringsten Kohlenstoffgehalt, während wiederverwendeter Beton mit Polymerzusatz den höchsten Kohlenstoffgehalt aufweist.

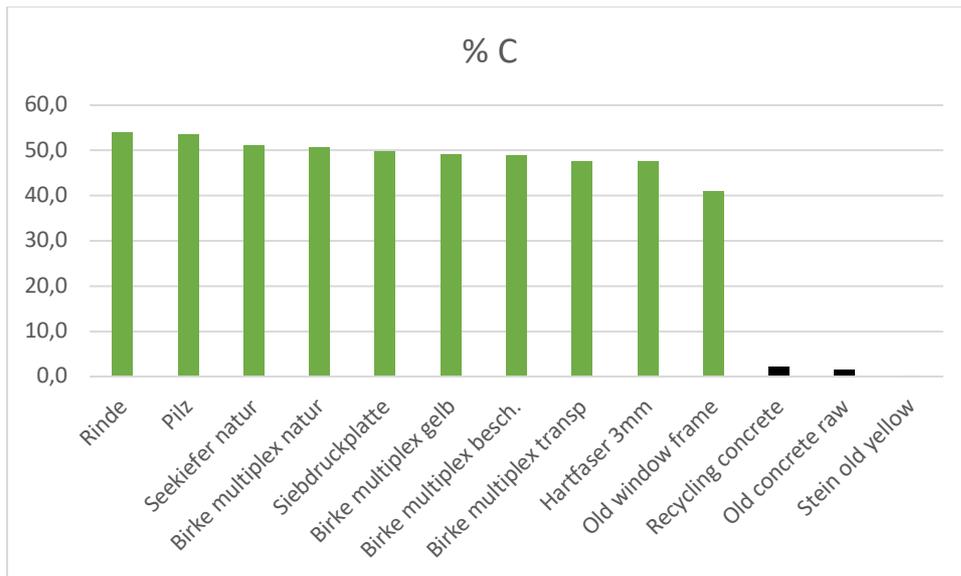


Abbildung 15. Der Kohlenstoffgehalt von Materialien auf Biomassebasis ist mit grünen Balken dargestellt. Der Kohlenstoffgehalt von Materialien auf mineralischer Basis ist mit schwarzen Balken dargestellt. Der Kohlenstoffgehalt von Stein liegt unter 1 % und ist in dieser Abbildung nicht enthalten.

Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in dem Pavillon und die entstehenden Emissionen unter verschiedenen Szenarien

Die potenzielle Kohlenstoffspeicherung des Pavillons und die mit dem Bau des Pavillons verbundenen Kohlenstoffemissionen wurden geschätzt anhand der oben beschriebenen Kohlenstoffzyklusbewertung unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien. Diese Szenarien berücksichtigen den Einfluss von Unterschieden in der Materialdichte von Holz (Nadelholz und Laubholz) und Lehmsteine, die mit Kalk oder Zement stabilisiert sind (siehe Tabelle 4). Die Ergebnisse für die Szenarien 1 und 2 sind:

- 1) Verwendung von Nadel- und Laubholz in der Konstruktion und ihr Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung und -emissionen:
Die Holzkonstruktion des Pavillons aus Laubholz würde im Durchschnitt 40 % mehr Kohlenstoff speichern als eine Konstruktion aus Nadelholz. Auch die potenziellen Kohlenstoffemissionen wären bei der Nadelholzkonstruktion höher als bei der Laubholzkonstruktion.
- 2) Verwendung unterschiedlicher Technologien bei der Herstellung von Holzbauteilen und Lehmblöcken und ihr Einfluss auf die Kohlenstoffemissionen:
Die Variation der Kohlenstoffemissionen der Lehmsteine hängt von der für ihre Herstellung verwendeten Technologie und ihrer Dichte ab. Der Anteil an Kalk oder Zement, der zur Stabilisierung der Lehmsteine zugegeben wird, erhöht linear den Energiebedarf und die damit verbundenen Kohlenstoffemissionen. Verschiedene Technologien zur Herstellung von Holzwerkstoffen, z. B. die Verwendung von Klebstoffen, erhöhen die Kohlenstoffemissionen um das bis zu 3,6-fache. Bei Lehmsteinen wirkt sich die Herstellungstechnologie wesentlich stärker auf die Emissionen aus (bis zum 100-fachen) als bei den Holzwerkstoffen. Sobald mehr Informationen (z. B. Baumart, Dichte der Lehmsteine, Transportentfernungen, eingesetzte Energie usw.) über die im Pavillon zu verwendenden Materialien vorliegen, können die nachstehenden Schätzungen neu bewertet und ihre Spannen verfeinert werden.
- 3) Verwendung von Holzbaumaterialien und Lehmsteine in der Konstruktion und ihr Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung des Gebäudes:
Das Gebäude kann zwischen 7618 und 10469 kg Kohlenstoff speichern abhängig von Holzart und Lehmsteindichte. Die Holzmaterialien würden 78 bis 87 % davon speichern und die Lehmsteine würden 13 bis 22 % enthalten.

Tabelle 4. Volumen, Dichte, Kohlenstoffemissionen und Lagerung von Holzmaterialien und Lehmsteinen, die für die Konstruktion des Pavillons verwendet werden könnten.

Material	Volumen	Dichte	Kohlenstoffemissionen verbunden mit der Materialproduktion(embodied carbon)			Kohlenstoffspeicherung
	m ³	kg per m ³	kg C Beste Annahme	kg C min	kg C max	kg C mittel
Nadelholz	25	750	8250	3750	13500	8719
Laubholz		500	5500	2500	9000	6263
Lehmstein I	98	2000	5000	100	10000	1750
Lehmstein II		1500	4000	75	7500	1355

Wiederverwendeten Materialien konnten in diese Schätzungen nicht einbezogen, da uns die oben beschriebenen Eingangsdaten (Volumen und Dichte) fehlten.

3.3.3. Zusammenarbeit mit AP 2

Mehrere Diskussionen über die Bewertung des Kohlenstoffkreislaufs von wiederverwendeten Materialien fanden statt und eine Messung des Kohlenstoffgehalt der wiederverwendeten Materialien von Haus des Statistik und Materials Mafia im CNS-Analysator im Chemielabor des Instituts für Ökologie der TU Berlin fand statt (Abbildung 15).

3.3.4. Alternativmeilensteine

Zusätzlich zu den beiden oben beschriebenen Meilensteinen haben wir ein Schaubild entworfen, welche die Umwandlung von Holz in Wald und Stadt sowie den damit verbundenen Kohlenstoffkreislauf zeigt (siehe Abbildung 16). Das Schaubild soll ein Teil der Ausstellung im Pavillon PROTO Potsdam werden und wurde zusammen mit den Studierenden der TU Berlin entwickelt, die an dem Studienprojekt "Holz in Stadt und Wald" unter der Leitung von Prof. Galina Churkina teilnahmen.

Ziel ist es, die "Bauwende", also das übergreifende Thema der Ausstellung, in Szene zu setzen und ein systematisches Bild des Gesamt-Projekts aufzuzeigen. Das Schaubild erklärt, was mit dem Holz in einem Wald ohne und mit menschlichem Einfluss geschieht und zeigt verschiedene Wege der Holzverwendung in der gebauten Umwelt auf. Die Abfolge der Holzumwandlung wird durch das Aufkommen des Kohlenstoffs ergänzt, der während dieser Holzumwandlungen in verschiedenen Formen gespeichert, gebunden und freigesetzt wird. Das Schaubild erklärt verschiedene Prozesse, die in den Kohlenstoffkreislauf involviert sind und hebt Senken hervor, in denen Kohlenstoff gespeichert werden kann.

Legende

-  Kohlenstoffdioxid
-  Kohlenstoff
-  Sauerstoff
-  Methan

Zoom ins

1. Kohlenstoff
2. Theoretisches Gleichgewicht
3. Kohlenstoffspeicherung im Wald
4. Entwicklungsphasen eines Baumes
5. Was ist Holz?
6. Photosynthese
7. Totholz
8. Mineralisation und Humifizierung
9. Kohlenstoff in den verschiedenen Sphären
10. Forstwirtschaft
11. Produkte der Holzverarbeitung
12. Kohlenstoffspeicherung in der Stadt
13. Altholz
14. Verbrennung
15. Pyrolyse
16. Recycling
17. Methan
18. Deponie

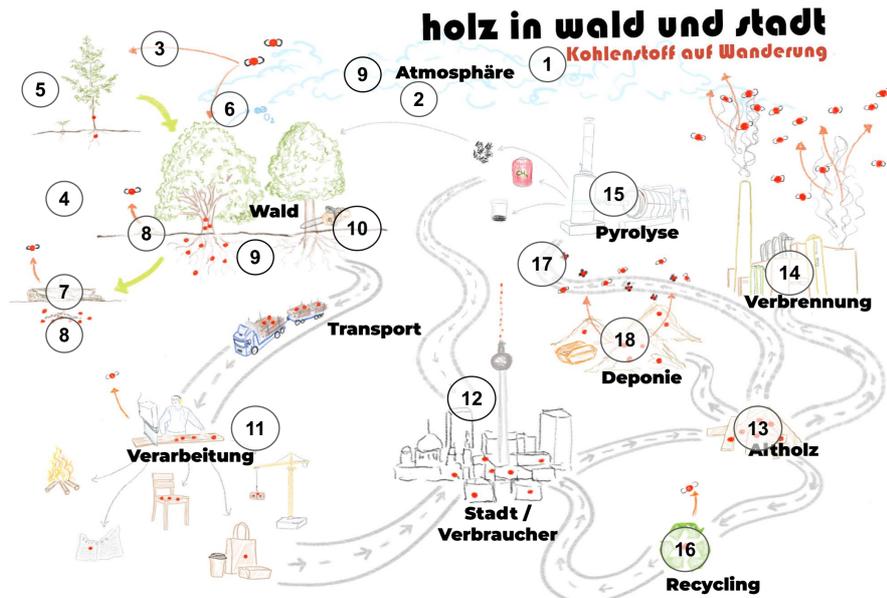


Abbildung 16: Umwandlungen von Holz in Wald und Stadt und der damit verbundene Kohlenstoffkreislauf. Eine Beschreibung der Vergrößerung der Kreise findet sich im Anhang.

Die nächsten Schritte der CO₂-Lebenszyklusanalyse für den Pavillon "ProtoPotsdam" umfassen:

- Vervollständigung des Datensatzes, der für die Schätzung der Kohlenstoffspeicherung und -emissionen des Pavillons und des potenziellen Gebäudes erforderlich ist. Diese Daten beinhalten den Energiebedarf für die Verarbeitung von recycelten Materialien, Holz und Lehmsteinen, die Materialdichte für recycelte Materialien, Holz und Lehmsteine sowie die Transportentfernungen für alle oben genannten Materialien.
- Wiederholen Sie die Bewertung des Kohlenstoffkreislaufs mit dem vollständigen Eingabedatensatz.

3.3.5 Fazit

Verwendung von Nadel- und Laubholz in der Konstruktion hat einen deutlichen Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung des Gebäudes. Wenn Laubholz als Baumaterial angewendet wird, ist das Kohlenstoffgehalt des Holzteilen ist 40% höher als für Nadelholzkonstruktion. Technologien bei der Herstellung von Holzbauteilen und Lehmsteinen haben einen bemerkenswerten Einfluss auf die Kohlenstoffemissionen.

3.4 Life Cycle Design/ Lebenszyklusdesign (AP 4)

*Autor*innen Kapitel 3.4: Claudia Bode (Bauhaus Erde gGmbH), Moritz Henes (TU Berlin, Natural Building Lab/NBL)*

Dieses Arbeitspaket wurde vom Bauhaus Erde in Zusammenarbeit mit dem Natural Building Lab der TU Berlin geleitet. In einem iterativen und experimentellen Design-Forschungsprozess untersuchten wir, wie die übergreifenden Forschungsfragen in der Gestaltung einer kleinen Struktur oder Pavillon, die wir "ProtoPotsdam" genannt haben, konkretisiert und getestet werden können. "ProtoPotsdam" ist gleichzeitig als Kommunikationsplattform, Ausstellung und Forschungslabor konzipiert.

Unser Forschungs- und Gestaltungsprozess für diesen Pavillon begann mit der Identifizierung eines möglichen Standorts im Zentrum Potsdams und der Definition unserer übergreifenden Forschungsleitfragen. Ende 2022 reichten wir einen Bauantrag bei der Stadt Potsdam ein, der Plansatz wurde im Januar 2023 verfeinert und erneut nachgereicht. Ende Januar 2023 stellten wir den ersten Entwurf für diesen Pavillon dem Gestaltungsbeirat in Potsdam vor. Aufgrund des innovativen und experimentellen Charakters dieses Pavillons kann der Entwurfsprozess die (in der HOAI definierten) Leistungsphasen nicht kaskadenartig durchlaufen. Vielmehr handelt es sich um einen iterativen Prozess, der Entwurfs-, Bau- und Materialbeschaffungsabläufe eng miteinander verzahnt, während der gesamten Detaillierungs- und Umsetzungsphase laufend weitergeführt wird und immer wieder Anpassungen erfordert. In diesem Bericht wird im Wesentlichen auf die zentrale Entwurfsplanung eingegangen, die mit der Einreichung des Bauantrags Ende Januar dokumentiert ist und direkt im Anschluss noch weiter ausgearbeitet wurde.

3.4.1 Grundlagen, Anforderungen, Entwurf

"ProtoPotsdam" wird ein Ort sein, der einen neuen öffentlichen Diskurses eröffnet. Durch transdisziplinäres Lernen, Austausch, Debatten, Information und künstlerische Interpretationen soll eine breite Aufmerksamkeit geschaffen werden für die drängenden Themen zum Umbau des Bausektors. Neben dem gesellschaftlichen Diskurs dient der Forschungspavillon auch der Materialforschung und gezielten architektonischen Experimenten. Der Demonstrationsbau sucht konkrete Antworten auf die zentrale Frage: "Was bedeutet in Brandenburg das Bauen mit regionalen, kreislauffähigen und regenerativen Materialien?"

Für den zentral in der historischen Innenstadt gelegenen Standort, auf einer durch Kriegseinwirkung entstandenen Baulücke, in einem ansonsten weitgehend wiederhergestellten Barock-Ensemble gilt es, eine zeitgemäße Ergänzung zu entwickeln, deren Parameter durch den temporären Pavillon vorbereitet und breit diskutiert werden können.

Raumprogramm und Funktion werden daher durch folgende Zielsetzungen definiert:

1) flexibler, öffentlich zugänglicher Raum

ProtoPotsdam wird im Laufe seiner temporären Standzeit einer Vielzahl von Veranstaltungen, Workshops, Seminaren, Events, Filmvorführungen, künstlerischen Darbietungen und anderen Formen des Austauschs Raum geben: organisiert vom Bauhaus Erde in Kooperation mit anderen Organisationen und Initiativen aus Potsdam und Umgebung sowie deren Netzwerken. Zu diesem Zweck muss der Pavillon als ästhetisch ansprechender, einladender Ort mit robustem, selbsterklärendem Funktionskern konzipiert sein.

2) starke urbane Form

Der Pavillon soll ein architektonisches Statement abgeben, das sich an den drängenden Fragen der Zeit orientiert: Durch seine Erscheinungsform wird der Pavillon selbst zu einem Diskursinstrument. Er wird unter Verwendung regionaler biobasierter, sowie sekundär verwerteten Materialien gebaut und unter der strengen Prämisse der zukünftigen vollständigen Demontage und Wiederverwendung konstruiert.

3) experimenteller Erfahrungsraum

Bauweise und Materialverwendung machen den Besucher*innen und Nutzer*innen Informationen über die Materialien, Orte, Akteure, Abläufe und Prozesse im wörtlichen Sinne begreifbar. In erster Linie geschieht die Vermittlung unmittelbar haptisch und visuell über die Form und Mitmach-Möglichkeiten. Das Bespielungsprogramm regt zur kritischen Auseinandersetzung, Adaption und Weiterführung an im Sinne einer kulturellen Übersetzungsarbeit.

4) Labor-Prüfstand für innovative Baumaterialien und Konstruktionsweisen

Der Pavillon wird ein offenes einsehbares Testlabor und Demonstrationsobjekt sein für die Fortentwicklung von Biobasierten Baumaterialien und Wiederverwendung und Wiederverwertung.

Die stufenweise Umsetzung in aufeinanderfolgenden Bauabschnitten, sowie leichte Anpassungen und Veränderungen erzeugen ein lebendiges sich immer wieder neu präsentierendes Testfeld, das insbesondere die saisonalen Witterungseinflüsse antizipiert und thematisiert.

3.4.2 Entwurfsbeschreibung

Siehe Zeichnungen im Anhang A_21_Entwurfszeichnungen.

Der Pavillon integriert und repräsentiert in seiner Komposition alle Ansätze der vertiefenden Begleitforschung über konkrete Anwendungsbeispiele in verschiedenen unabhängigen Modulen. Einzelne dieser Komponenten werden bereits im Sommer 2023 umgesetzt, andere sind Teil längerfristiger Entwicklungs- und Zertifizierungsprozesse und werden voraussichtlich erst in darauffolgenden Bauabschnitten realisiert.

- Komponente 1: weitgehend versickerungsoffene Gartenlandschaft, die auf die Lage der bestehenden Grundmauern reagiert und die Versammlungs-Räume erweitert
- Komponente 2: Lehmkonstruktion, der den Funktionskern mit Trockentoiletten und eine Küche/Bar räumlich organisiert.
- Komponente 3: multifunktionaler Raum, gestaltet und geprägt durch Prototypen für Systeme mit zirkulären Materialien.
- Komponente 4: Selbsttragende Holzkonstruktion aus regional gewonnenem und verarbeitetem Holz als raumbildende Skulptur.
- Komponente 5: Integrierte Materialtest- und Ausstellungsboxen, sowie Ausstellungs-Module
- Komponente 6: transluzente Textilfassade, die sowohl die Holzstruktur als auch den offenen überdachten Veranstaltungs-/Ausstellungsraum umhüllt.
- Komponente 7: Dach/Oberfläche zur Sammlung von Wasser und Sonnenenergie.

Der Bau des Pavillons ist als situative räumliche Choreographie zu verstehen, die einzelnen Bauschritte und -komponenten thematisiert und in die Öffentlichkeit vermittelt. Der Pavillon wird so schon während der Bauphase zu einer Bühne der Bauwende.

3.4.3 Forschungsfragen und Entwurfsansätze für Hauptbauteile, Phase 1

Die Hauptkomponenten setzen den Fokus auf die Nutzung der vorhandenen Ressourcen am Standort, die Verwendung von gemischten Holzarten nach bei Waldumbau perspektivisch zu erwartender Materialverfügbarkeit (siehe Kapitel 3.1), die Konstruktion mit gepressten Lehmsteinen aus regional beschaffenem Aushubmaterial (siehe Kapitel 3.5) und die Integration von Praktiken des zirkulären Bauens, einschließlich der Planung für die Demontage und Einsatz von wiederverwendeten Materialien (siehe Kapitel 3.2).

3.4.3.1 Nutzung Vorhandener Ressourcen

Im Zuge der Konzeption für den Forschungspavillon entstand die Idee, die vermutlich noch vorhandenen Fundamente der Vorgängerbebauung als Gründung für den Pavillon demonstrativ zu nutzen.

Im Rahmen einer Bodenuntersuchung zur Tragfähigkeit wurde in Absprache mit den, den Entwurfsprozess begleitenden Bauingenieuren von ZRS-I, neun Schürfstellen zur Erkundung und augenscheinlichen Beurteilung der Fundamente festgelegt. Wie vermutet konnten im Untergrund teilweise die Fundamente gefunden werden. Neben mit Ziegeln gemauerten Mauerwerksstreifen mit Kalksteinfundamenten, sind zusätzliche Kalksteinfundamente ohne zugehöriges Mauerwerk gefunden worden. Diese könnten zu einer vorherigen Bebauung von 1712 gehören. (siehe Anhang A_22 Archäologischer Bericht).

Im weiteren Planungsprozess wird die Gründung auf die Bestandsfundamente im Detail geklärt und entwickelt.

3.4.3.2 Verwendung von gemischten Holzarten nach bei Waldumbau perspektivisch zu erwartender Materialverfügbarkeit

Verfügbarkeit des Materials

Wie aus der Potentialanalyse der HNEE im Kapitel 3.1 hervorgeht, wird sich der Waldbestand, und dadurch das verfügbare Bauholzsortiment, durch eine Klimaanpassung verändern. Die zurzeit in Brandenburg vorherrschende Kiefer wird abnehmen, und vor allem Laubhölzer wie Buche, Eichen, Robinen, Birken und Pappel aber auch andere trocken-tolerante Holzarten wie Ahorn, Linden und Ulmen werden zunehmen.

Den größten und wichtigsten Anteil, 85 %, des Holzes für die Verwendung im Hochbau wird aktuell aus Nadelholz hergestellt. Laubhölzer bilden mit einem Anteil von 13 % den deutlich kleineren Anteil [WJ13]. Während die Verwendung von Nadelhölzern, Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie und Lärche als Bauholz geregelt und zugelassen ist, gibt es nur für die Laubhölzer Buche und Eiche, Esche und Birke bereits Normen und eine Zulassung für die Verwendung als Bauholz. Andere Laubhölzer können nach DIN EN 14081-1 für tragende Zwecke als Schnittholz im konstruktiven Holzbau nur mit einer Zulassung im Einzelfall verwendet werden, da es für diese Holzarten keine Zuweisung der Sortierklassen in Festigkeitsklassen nach DIN EN 1912 gibt. Für Kielgezinktes Holz nach DIN EN 15497 kann von den Laubhölzern nur die Pappel verwendet werden.

Während vor allem Eiche bereits Anwendung als Bauholz in der Sanierung von Fachwerkgebäuden findet, werden zunehmend Baustoffe aus Buchenholz und anderen Laubhölzern, z.B. Baubuche (Buchen Furnierholz) oder Brettspertholz aus Birke, entwickelt und finden Anwendung im Holzbau [IH17]. Die Verwendung von Laubhölzern, als Bauholz, ist derzeit aufgrund der unregulierten Zulassung und unzureichenden Verfügbarkeit eingeschränkt, gewinnt aber an Bedeutung. Auf Grundlage der zu erwartenden Entwicklung des Holzbestandes ist von einer vermehrten zukünftigen Verwendung von Laubhölzern im Holzbau auszugehen. Darüber hinaus ist eine Verwendung von Pappel-Holz aus Agroforstsystemen in Betracht zu ziehen.

Neben dem sich verändernden Waldbestand, verändert sich auch die Struktur der Holzverarbeitenden Handwerksbetriebe und Industrie. Die Holzbauquote in Deutschland ist in den vergangenen Jahren stetig gestiegen und liegt im Bundesdeutschen Durchschnitt der Wohngebäude bei 21,3 %. Allein in den vergangenen Jahren hat sich die Quote von 17,6 %, 2017, auf 21,3 %, 2021, erhöht. Die Zahlen verdeutlichen die steigende Bedeutung des Holzbaus in der Region Brandenburg [HD22].

Der Trend zeigt eine Verschiebung der Betriebsstruktur von kleinen Unternehmen (bis 5 und 5-9 Beschäftigte), welchen im Jahr 2020 mit Bundesweit 11.139 Betrieben immer noch die meisten Betriebe zuzuordnen waren, hin zu größeren Betrieben mit mehr als 20 Personen, 2.633 Betriebe [vgl. Statistisches Bundesamt, zitiert nach de.statista.com 2023]. Die traditionellen, ursprünglich relativ gleichmäßig verteilten, Holzbaubetriebe weichen größeren zentralisierteren Betrieben. Kleinere Betriebe sind, aufgrund der Personellen Besetzung, nur in der Lage kleinere bzw. eingeschränktere und spezialisiertere Projekte umzusetzen und haben nicht die Möglichkeiten Innovationen voranzubringen, sie sind vielmehr auf Innovationen anderer Akteure angewiesen [SHR08].

Entwurfsansatz

Der Pavillon verfügt über ein großes, repräsentatives Tragwerk aus regionalem Holz, das aus verantwortungsvoll bewirtschafteten öffentlichen Wäldern der Region stammt. Das übergeordnete Ziel dieser Struktur ist die Erforschung und Demonstration von Synergien zwischen ökologischem Waldbau

(im Gegensatz zur Produktionsforstwirtschaft) und regenerativem Bauen. Zu den übergreifenden Erzähl- und Forschungszielen dieses Teils des Pavillons gehören zwei Aspekte:

- a) **Materialbeschaffung:** Die Baumarten wurden so ausgewählt, dass sie so stellvertretend wie möglich für das sind, was in einem regionalen, verantwortungsvoll bewirtschafteten Mischwald verfügbar ist und sein wird. Darunter sind viele verschiedene Laubholzarten, die normalerweise nicht für den Bau verwendet werden, sowie einige Nadelholzarten wie Kiefer, die (derzeit) weithin verfügbar sind. Unter den Bäumen selbst befinden sich auch "nicht so ideale" Exemplare, z. B. Lichtungsholz oder kleinere, dünnere Bäume, die typischerweise als Brennholz verkauft werden.

Der Geist des "Nehmens, was der Wald uns gibt" – ist ein signifikanter Perspektivwechsel, der sich von den extraktivistischen Ideologien entfernt, die zu Deutschlands Geschichte des Plantagenwaldbaus geführt haben - und bietet eine Gelegenheit für das Design selbst, auf die unbequeme Realität der Verwendung von Holz zu reagieren, das außerhalb der Industrie- und Regulierungsstandards liegt.

- b) **Architektonische Gestaltung:** Bei der Konstruktion werden sowohl Bäume aus der Region (siehe oben) als auch, soweit erforderlich, wiederverwendete Holzteile aus der Region verwendet. Das Bauwerk selbst soll nicht nur Innovationen bei der Materialbeschaffung demonstrieren, sondern auch eine Reihe Konstruktionsstrategien, die das natürliche Wachstum und die Sterblichkeit von Wäldern auf die Bauelemente abbilden. Diese Planungsstrategien umfassen:

- Erforschung und Demonstration, wie kleine, dünne oder minderwertige Laubholzbauteile in weitgespannten Strukturen effektiv genutzt werden können.
- Erforschung und Demonstration einfacher, sich wiederholender Verbindungsmethoden, die den Ab- und Wiederaufbau der oben genannten Struktur mit einem Minimum an zusätzlichem Material ermöglichen.
- Erforschung und Demonstration der hochspezifischen Anwendung bestimmter Baumarten und einzelner Elemente innerhalb einer tragenden Struktur unter Berücksichtigung von Eigenschaften wie Sortierklasse, Wetterbeständigkeit, Anfälligkeit für Fäulnis oder Insekten, Härte usw. Diese differenziertere Art der Materialspezifikation ermöglicht die Zuordnung oder Indizierung von Baumarteneigenschaften und -qualitäten zu einer Struktur.
- Eine Grundlegende Idee für das Tragwerk des Pavillons war es eine einfache und mit einfachen Mitteln zu realisierende Holzbaustruktur zu entwerfen, welche von einer möglichst großen Bandbreite an Akteuren realisiert werden kann.

3.4.3.3 Konstruktion mit gepressten Lehmsteinen aus regional beschaffenem Aushubmaterial

Ausgangslage

Das Bauen mit Lehm hat in den letzten Jahren bedeutende regulatorische Fortschritte gemacht und wird ab dem Frühjahr 2023 durch Inkrafttreten der DIN 18940 für tragendes Lehmsteinmauerwerk weiter an Möglichkeitsraum dazugewinnen. Nachdem neu hervorgebrachte Normierungs- und Regelwerke in den letzten Jahren bereits die historische Sanierung mit Lehm, wie auch Ausbauprodukte rund um Lehmbauplatten- und Lehmputze auf dem Markt etablieren konnten, liegt in der DIN 18940 nun ein Vorstoß hinzu komplexeren Anwendungsgebieten. Es wird dann möglich sein, tragendes Lehmsteinmauerwerk bis zu einer Gebäudehöhe von 13 Metern herzustellen.

Die Möglichkeiten, die in diesem vielseitigen und regionalen Material stecken, wurden in dem in Kapitel 3.5 ausführlich beschriebenen Forschungsprojekt (assoziierte Masterarbeit) mit der Frage "Sind gepresste Lehmsteine für das Bauen in der Ressourcenregion Berlin-Brandenburg geeignet?" erforscht.

Entwurfsansatz

Wie bei der tragenden Holzstruktur umfassen die Gesamtdarstellung und die Forschungsziele dieser Komponente des Pavillons zwei Aspekte.

- a) **Materialbeschaffung:** Die für den Bau von gepressten Lehmsteinen geeignete Erde wird häufig als Abfallprodukt entsorgt. Dieses Material könnte stattdessen als wertvoller Rohstoff und nicht als Belastung verstanden werden; das mit diesem Projekt verbundene Forschungsprojekt

untersuchte das Potenzial der Verwendung von Lehm, die von regionalen Standorten stammt (z. B. von Baustellen, auf denen der Boden bereits gestört ist), um tragende Steine herzustellen, die die Anforderungen der neuen DIN 18940 erfüllen. Da die Lehmsteine bei Nässe in denselben Rohstoff zerfallen, aus dem sie hergestellt wurden (vorausgesetzt, sie enthalten keine Zusatzstoffe wie Zement), kann das Material als abfallfrei und unbegrenzt wiederverwendbar angesehen werden, ohne Downcycling. Einer der im Rahmen des Forschungsprojekts untersuchten Standorte wurde als Quelle für die Ziegel für diesen Pavillon identifiziert, die zusammen mit Studenten der TU Berlin Habitat Unit im eigenen Haus gepresst werden.

- b) **Architektonische Gestaltung:** Der Pavillon hat eine "Kernstruktur", die aus regional beschafften und gepressten Lehmsteinen so wie regionale beschafftem Holz errichtet wird. Die Struktur enthält Toiletten und eine Bar/Küche. Mit dem Entwurf dieser Struktur soll das architektonische und statische Potenzial einfacher, sich wiederholender Bausteine demonstriert werden, wobei der Schwerpunkt auf folgenden Aspekten liegt:
- Erkundung und Demonstration des Potenzials einfacher, sich wiederholender Module zur Erzeugung spielerischer und einladender Geometrien.
 - Erforschung und Demonstration des Potenzials für die Herstellung und Wiederherstellung dieses Materials, um ein Motor für öffentliches Engagement und Bildung zu werden.
 - Erforschung und Demonstration der möglichen Witterungsschutzstrategien für Lehm.

3.4.3.4 Integration von Praktiken des zirkulären Bauens, einschließlich der Planung für die Demontage und Einsatz von wiederverwendeten Materialien

Ausgangslage

Das Ziele der Zirkulären Bauweise ist, durch einen wiederholten und dauerhaften Einsatz von Rohstoffen den Ressourcenverbrauch und die Abfallmenge der Bauwirtschaft zu reduzieren bzw. zu vermeiden.

Aus dem Kapitel 3.2 kann zitiert werden:

„Während mit dem Begriff „Regeneratives Bauen“ die Bereitstellungen von Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen bezeichnet wird, wobei durch Photosynthese und Wachstum von Holz CO₂ aus der Atmosphäre gebunden wird, zielt der Begriff „Zirkuläres Bauen“ auf den Einsatz von Materialien aus dem Baubestand bzw. dem anthropogenen Lager, der „Urbanen Mine“, ab. Im Sinne einer kreislaufgerechten und ressourcenschonenden Bauwirtschaft liegt der Fokus des zirkulären Bauens auf der Wieder-/Weiterverwendung von Bauteilen und Bauprodukten (Vermeidung von Abfall) sowie hochwertigem Baustoffrecycling. In Abbildung 4 sind die Aspekte des zirkulären Bauens dargestellt. Ziel ist, den Einsatz von Primärrohstoffen sowie Deponierung und energetische Verwertung von Baustoffen zu vermeiden bzw. zu reduzieren und Bauprodukte, soweit möglich, durch Wieder-/Weiterverwendung und Recycling im Kreislauf zu führen.“

Bereits in der Planungsphase sollte definiert werden, mit welchen Strategien die eingesetzten Materialien und Bauprodukte dauerhaft in Kreisläufen gehalten werden können. Die EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG bewertet und hierarchisiert in folgender Reihenfolge die Umgangsstrategien: Verzicht, Vorbereitung zu Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung. (Artikel 4 Absatz 1, EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG). Reine Biobasierte Materialien könne auch durch eine Kaskadennutzung die Kreisläufe schließen, wenn am Ende ihres Lebenszyklus wieder dieselbe Menge an Biomasse nachgewachsen ist [SH21]. Die Weiterverwendung von einzelnen Hölzern, aus vorherigem Gebrauch oder aus Restholzquellen, welche ansonsten in eine thermische Verwertung überführt werden, kann mit einigen Einschränkungen in den verfügbaren Querschnitten einhergehen, die sich für eine spätere Weiterverwendung nicht mehr eignen. Da dieses Material aber vor einer thermischen Verwertung bewahrt wurde und somit länger im Kreislauf verbleibt, kann dies trotzdem positiv bewertet werden.

In einer Untersuchung von Tingley et al. [TCC17] zur Wiederverwendung von Stahlbauteilen in Großbritannien, identifizieren die Autoren drei Wiederverwendungsstrategien: Es kann die

Wiederverwendung ganzer Gebäude, Bauelemente, z.B. Fassadenelemente, oder von nur einzelnen Bauteilen wie z.B. Stützen, am selben Einsatzort oder an einem anderen Ort erfolgen. Auf Grundlage dieser Wiederverwendungsmöglichkeiten definiert Beurskens fünf Design-Strategien zur Wiederverwendung von Gebäuden, Elementen oder Bauteilen, welche jeweils unterschiedliche Anforderungen und Überarbeitungsintensitäten aufweisen [Beu21]. Bei einer unveränderten Wiederverwendung werden Gebäude, Elemente oder Produkte ohne, bzw. mit kleinen Oberflächlichen, Veränderung oder Anpassung im oder in einem andern oder demselben Kontext für denselben Zweck wiederverwendet. Die rekonfigurierte Wiederverwendungsstrategie zielt darauf ab, dass kleine Änderungen zur Anpassung vorgenommen werden können, die zu einer Wiederverwendung des Produktes mit gleichen Eigenschaften führen. Eine weitere Möglichkeit bietet die überarbeitete Wiederverwendungsstrategie, bei welcher das wiederzuverwendende Bauteil überarbeitet und angepasst wird. Dadurch können Produkte an neue Standards angepasst werden. Die Wiederverwendung in einer anderen Funktion, ermöglicht dass das Produkt länger in der Verwendung bleibt, bedeutet allerdings ein Downcycling. Die kaskadische Wiederverwendung, ebenfalls ein Downcycling-Prozess, beschreibt die teilweise Zerstörung von Produkten und deren Verwendung zu einem anderen Zweck [Beu21]. Um eine Wiederverwendung der verbauten Materialien und Bauteilen zu gewährleisten, sollten bereits in der Planungsphase geeignete Material- bzw. Bauteilgerechte Strategien und Ziele definiert werden.

Für die Bewertung und Messung von zirkulären Bauweisen gibt es verschiedene Systematiken, bspw. der Urban Mining Index von Anja Rosen [Ros20] oder den Material Circularity Index der Ellen McArthur Foundation, die eine Aussage über das Kreislauf- und Wiederverwendungspotential geben. Aus den Bewertungssystematiken können im weiteren Verlauf des Entwurfprozesses Strategien entwickelt werden, wie eine zirkuläre Bauweise gewährleistet werden kann. Für den Experimentierpavillon, der neben der zirkulären Bauweise noch andere Anforderungen wie Regionalität und Emissionsvermeidung erfüllen muss, sind die Bewertungsmaßstäbe dementsprechend anzupassen und abzuwägen.

Entwurfsansatz

Eines unserer Ziele war es, in Zusammenarbeit mit Partner*innen aus dem Haus der Materialisierung (AP 2) die Verwendung von recycelten und wiederverwendeten Materialien zu demonstrieren. Dabei handelt es sich um Aluminium-Dibondplatten, Rest-Holzwerkstoffplatten, Geopolymerbeton, gebrauchte Fenstermodule und Mycel-Verbundstrukturen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Materialien ist in Kapitel 3.2 zu finden.

Für jedes dieser Materialien wurden ein oder mehrere Prototypen entwickelt. Die Forschungsarbeiten zu Geopolymerbeton und Myzel-Verbundstrukturen werden nicht direkt in die Struktur des Pavillons eingebaut. Diese Komponenten werden in einer zukünftigen Ausstellung im Pavillon zu sehen sein und werden als Teil von AP 2 beschrieben. Zu den Prototypen, die in die Struktur integriert werden, gehören:

- Aluminium-Dibondplatten: Innenverkleidung von Toiletten, Pflanzkästen für Indoor-Farming
- Rest-Holzwerkstoffplatten in Verbindung mit Aluminium-Sandwichpaneelen: nicht tragende Innentrennwandmodule.
- Wiederverwendete Fenster: modulare Fassadenelemente

Die für diese Prototypen gewählten Materialien erzählen jeweils eine einzigartige Geschichte, die Chancen und Hindernisse beim Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft aufzeigt, bspw. verdeutlicht das Vorhandensein großer Mengen von Aluminium-Dibondplattenabfällen die strukturellen Ineffizienzen bei der industriellen Produktion eines hochwertigen Materials, das sich kaum recyceln lässt. Indem wir diese Abfälle in Prototypen integrieren, die dann in den Pavillon eingebaut werden, können wir das Material aus dem Abfallstrom herausnehmen und gleichzeitig auf die Notwendigkeit eines größeren Bewusstseins für Materialabfälle während der Produktionsphase hinweisen. In dem Prototyp, der Aluminium-Dibondplatten mit Rest-Holzwerkstoffplatten (Innentrennwandmodule) integriert, wird das Potenzial für kreatives und funktionales Design unter ausschließlicher Verwendung von "Abfall"-Material in den Vordergrund gestellt.

Ebenso werden jedes Jahr extrem große Mengen an Fenstern aus Gebäuden durch Nachrüstung oder Abriss entfernt. Aufgrund rechtlicher und haftungsrechtlicher Hindernisse ist es nahezu unmöglich, diese Fenster in ihrer ursprünglichen Form in eine andere Struktur einzubauen, obwohl sie in vielen Fällen von sehr hoher Qualität sind. Die Integration von Fenstermodulen, die gebrauchte Fenster enthalten, in die

Konstruktion ermöglicht es uns, eine mögliche alternative Zukunft für dieses Material aufzuzeigen. Da sich die energetische Gebäudesanierung in Deutschland häufig auf Fassadenkomponenten wie Fenster konzentriert, wird das Angebot an gebrauchten Fenstern voraussichtlich hoch bleiben. Die Integration dieser Module in den Entwurf ermöglicht eine Diskussion über die unbeabsichtigten Folgen der forcierten Gebäudesanierung - an sich eine sehr wünschenswerte Alternative zu Abriss und Neubau -, die sowohl technische als auch regulatorische Aspekte umfasst.

Die Logistik der Verwendung von Materialien, die "abgebaut" wurden, kann äußerst komplex sein. Wiederverwendete Materialien oder Bauteile müssen so früh wie möglich im Planungsprozess identifiziert und gegebenenfalls auf ihre Konformität mit den technischen Vorschriften geprüft werden; die frühzeitige Beschaffung von Materialien bringt jedoch die Herausforderung mit sich, bis zum Beginn der Bauphase eine geeignete Lagerung zu finden. Darüber hinaus müssen kritische Haftungsfragen geklärt werden, entweder direkt mit den Hersteller*innen (die bereit sind, die Haftung für die Wiederverwendung ihrer Produkte zu übernehmen) oder durch externe technische Sachverständige, die bereit sind, zu bescheinigen, dass ein wiederverwendetes Material oder Bauteil die gesetzlichen, lebensrettenden und bautechnischen Normen erfüllt. Typische Planungs- und Bauphasen in Deutschland (HOAI) verlaufen linear; sowohl Berufsverbände (z. B. die Architektenkammer) als auch Start-ups erkennen nun, wie die Notwendigkeit der Beschaffung, Bewertung und Lagerung von wiederverwendeten Bauteilen bereits in der Planungsphase die grundlegenden Annahmen darüber, wie Planungs- und Bauprozesse ablaufen, durchbricht.

3.4.4 Entwurfsprozess

Angesichts der Klimakrise und der Notwendigkeit einer Bauwende müssen sich auch Entwurfs- und Bauprozesse verändern. Die Verwendung von zirkulären und regenerativen Baumaterialien führt zu Verschiebungen der Abläufe, sodass die bisher in der HOAI beschriebenen Leistungs-Bausteine, besonders was die frühen Leistungsphasen betrifft, neu zusammengesetzt und ergänzt werden müssen. Fragen der Materialbeschaffung und der Detaillierung, die üblicherweise in späteren Phasen des Entwurfs behandelt werden, müssen früher geklärt werden; der Kreis der Partner und Interessengruppen erweitert sich, und es können andere (rechtliche) Beziehungen zwischen ihnen erforderlich werden; die Entwurfsprozesse werden, im Allgemeinen weniger linear und stärker iterativ werden. Um allerdings auch den Anforderungen der Kalkulierbarkeit und Risikominimierung im Planungsprozess gerecht zu werden, gilt es ein „robustes“ Design zu entwickeln, das Spielräume eröffnet, mit sich verändernden Materialverfügbarkeiten im Laufe des Prozesses umzugehen.

Der Entwurfsprozess für diesen Pavillon (der 2023 fortgesetzt wird) ist selbst experimentell und durchlief im Laufe des Jahres 2022 mehrere Schleifen. Obwohl diese kleine, temporäre Forschungsstruktur wenig komplex ist und kaum äußeren oder regulativen Zwängen unterliegt, können alle oben genannten Merkmale hier im Kleinen erprobt werden.

Planungsprozess: Phasen 2022

- *Erste Sondierungsphase (Juli, August 2022)*
Erster Überblick über die Standortbedingungen, Prüfung des geltenden Baurechts und Planungsrechts, erste Treffen mit allen Forschungspartner*innen. Sondierung von Entwurfsstrategien und Lösungen (BE und NBL). Sondierung möglicher Schwerpunktsetzungen.
- *Vorbereitung für das Zwischenkonsortium und erste Gespräche mit dem Bauamt (September 2022)*
Klärung der grundsätzlichen regulativen Anforderungen.
- *Zweite sondierende Entwurfsphase (Oktober, November 2022)*
Vertiefte Untersuchung von Entwurfsthemen, Entwicklung einer konzeptionellen Entwurfsskizze führte.
- *Bauantragseinreichung, parallel Bodenuntersuchungen (Dezember 2022)*
Während die Entwurfsskizze zu einem Zeichnungssatz für die Einreichung beim Bauamt zu Ende Dezember 2022 weiterentwickelt wurde, erfolgten geotechnische und archäologische Untersuchungen.
- *Überarbeitung des Zeichnungssatzes zur Wiedervorlage beim Bauamt, Vorbereitung der Präsentation vor dem Gestaltungsbeirat (Januar 2023)*

Der erste Zeichnungssatz wurde in Zusammenarbeit mit ZRS A/I überarbeitet und für die endgültige Wiedervorlage Ende Januar vorbereitet. Parallel dazu wurden interne Renderings für die Präsentation vor dem Gestaltungsbeirat erstellt.

Der dem Bauamt vorgelegte und vor dem Gestaltungsbeirat präsentierte Entwurfsstand ist diesem Bericht beigelegt.

3.4.5 Reflektion, Nächste Schritte

Seit der erneuten Einreichung des Zeichnungssatzes beim Bauamt sind die Arbeiten in den folgenden Bereichen vorangekommen:

- *Beschaffung von Holz aus regionalen Wäldern*
- *Entwicklung einer Materialdatenbank*
- *Integration der Ergebnisse aus den geotechnischen und archäologischen Gutachten in den Entwurf (Entwurfentwicklung)*
- *Aufarbeitung der in der baulichen Umsetzung transportierten Narrative zu Materialien, Bauweisen, und Verhältnis der gebauten Umwelt zur Landnutzung und verarbeitenden Infrastrukturen im Bausektor.*

Unser Prozess spiegelt die Herausforderungen wider, mit denen Architekt*innen konfrontiert sind, wenn sie in einem sehr frühen Stadium regenerative oder zirkuläre Materialien identifizieren und spezifizieren sollen: Architekturkonzepte müssen sehr schnell entwickelt werden, um eine erste Materialrecherche und -beschaffung zu ermöglichen; die ersten Ideen müssen jedoch flexibel genug sein, um auf die Gegebenheiten dieser Materialien zu reagieren. Letztendlich ist die Herausforderung in der gesamten Branche oft eher bürokratischer oder rechtlicher als technischer Natur, was sich in der Aufmerksamkeit zeigt, die dem zirkulären Bauen sowie dem Bauen mit Holz derzeit gewidmet wird. Neue Geschäftsmodelle für die Kreislaufwirtschaft, eine Neuordnung der traditionellen linearen Leistungsphasen, neue Modelle für vertragliche Vereinbarungen zwischen den Akteur*innen oder auch ganz neue Marktnischen (z.B. für die Logistik der Beschaffung von wiederverwendeten Materialien) werden in verschiedenen Zusammenhängen als Antwort diskutiert.

3.5 Assoziierte Masterarbeit: Potentialanalyse Lehm

*Autor*innen Kapitel 3.5 Christian Gäth und Micha Kretschmann (TU Berlin)*

3.5.1. Einleitung

Die Potenzialanalyse Lehm befasst sich mit der Forschungsfrage:

Sind gepresste Lehmsteine für das Bauen in der Ressourcenregion Berlin-Brandenburg geeignet?

Um ein ganzheitliches Verständnis für Wirkungsgrad und -weise der Lehmsteine zu erhalten, kann die Forschungsfrage in mehrere Unterfragen aufgeschlüsselt werden:

1. Was ist der Stand der Technik für gepresste Lehmsteine und wie kann dieser in den baurechtlichen Rahmenbedingungen Berlin-Brandenburgs angewandt werden?
2. Welche Ausgangsstoffe eignen sich zur Herstellung von gepressten Lehmsteinen?
3. Welche Umweltwirkungen gehen mit der Herstellung und dem Verbau der Steine einher?
4. Welche Anwendungsgebiete können die Steine erschließen und welche Substitutionen können sie initiieren?

Methodisch folgt die Arbeit drei Phasen:

Im ersten Teil der Arbeit werden vor einem gemeinsamen Verständnis für gepresste Lehmsteine verschiedene Ausgangsstoffe aus den Stoffströmen von mineralischen Abfall- und Nebenprodukten erörtert und diese für die Region Berlin-Brandenburg quantifiziert.

Der zweite Teil erforscht im praktischen Experiment, ob und in welcher Qualität gepresste Lehmsteine aus den Böden der Ressourcenregion hergestellt werden können. Durch ein detailliertes Verständnis für den Herstellungsprozess kann hier auch eine Lebenszyklusanalyse aufgestellt werden.

Im dritten Teil wird abschließend betrachtet, welche Anwendungen die Steine auf Grundlage des praktischen Experiments erschließen. Es werden baukonstruktive Beispiele im Bauteilmaßstab gegeben, ihre konventionellen Gegenüber erläutert und ihr Instandhaltungsaufwand bewertet.

3.5.2. Teil A: Theoretische Einführung

Als Verwitterungsprodukt natürlicher Gesteine besteht Lehm je nach Vorkommen zu variablen Bestandteilen aus Kies, Sand, Schluff und Ton [Mink09]. Wird Lehm im hiesigen Kontext heute eher geringfügig und in der Regel als Innenputz angewandt, kann er auch als massiver Baustoff verbaut werden. Lehmmauerwerk kann hierbei nicht nur als natürlicher Regulator des Raumklimas, Schall- und Brandschützer punkten, sondern auch eine tragende Funktion übernehmen. Sofern konstruktiv vor Witterung geschützt, kann Lehm sortenrein und ungebrannt verbaut werden und ist damit nach dem Ende einer Anwendung rückstandslos wiederverwendbar [vgl. Din 18945]. Mit Lehm einen weiteren leistungsfähigen natürlichen Baustoff in die Bauwende zu integrieren, mindert die Gesamtlast, die auf das Bauen mit Holz und damit auf die Wälder projiziert wird und befreit es dabei von Aufgaben, denen es nur in modifizierter Form gerecht wird. Im Zusammenspiel mit weiteren Regionalen Baustoffen wie Hanf, Stroh oder Kalk entsteht in der Summe ein Materialkanon, der eine der Region inhärente Architektur hervorbringen kann und im Rahmen ihrer Verfügbarkeiten zu einer angemessenen und regenerativen Baukultur führt.

Unter den zahlreichen Verarbeitungsmöglichkeiten von Lehm, liegt im Bereich der Lehmsteine das wohl größte Potenzial. Nicht nur, weil dies das reine Volumen des Baustoffs im Vergleich zu Putzen oder Plattenwerkstoffen und damit den Anteil regenerativer Baustoffe in einem Bauwerk erhöht, sondern auch, weil in den Bereichen des Bauablaufs und der bestehenden Handwerksstrukturen beste Voraussetzungen gegeben sind. Die Fertigung im Werk ermöglicht es, Lehmsteine unabhängig von Jahreszeit und Wetter unter kontrollierten Bedingungen herzustellen. Dies ist aufgrund des notwendigen Festigungsprozesses des Bindemittels Ton von großer Bedeutung und kann bei der Herstellung von Baustoffen auf der Baustelle zu Problemen führen. Für Stampflehm, der in der Regel vor Ort erstellt wird, gibt es daher nur einen vergleichsweise kurzen zeitlichen Spielraum im Frühling und Sommer, der zur Herstellung geeignet ist, damit die Bauteile in der verbleibenden Zeit vor dem Herbst aushärten können. Lehmsteine hingegen können in standardisierten Formaten und Prozessen ganzjährig hergestellt werden und je nach Bedarf zur Verwendung abgerufen werden. Mit Blick auf die Verarbeitung auf der Baustelle können Lehmsteine von der Integration in die existierenden Strukturen des Maurergewerks profitieren. Der Verbau von Steinen zu Mauerwerk ist geläufig und bedarf für Lehmsteine lediglich einer

Fortbildung jedoch nicht der Etablierung eines neuen Handwerkszweigs. Dies eröffnet im gleichen Zuge eine Zukunftsperspektive für die Maurer*innen und unterstützt die soziale Komponente der Bauwende.

Historie

Das mechanische Pressen von Lehmerde zu Steinen wird bereits seit dem späten 18. Jahrhundert erforscht. Seinen Ursprung findet es in den Arbeiten von François Cointeraux, welcher schon zu Zeiten der Französischen Revolution nach Wegen suchte, Lehm auf die Bühne der Industrialisierung zu stellen. Hierzu entwickelte er eine mechanische Presse Namens „La Crésise“, die den traditionellen Umgang mit Lehm rationalisierte und versuchte, den Baustoff im Geist der neuen Zeit zu interpretieren [Vgl. DeKS82, S.13]. Wohingegen bei Cointeraux Pionierarbeit Lehmerde noch über ein Fallgewicht in einem Presskopf verdichtet wurde, setzte sich über die Jahrzehnte ein abgewandeltes System durch, in dem die Lehmerde durch einen beweglichen Teller innerhalb des Presskopfes verdichtet wird. Die Druckkraft des Tellers entsteht durch eine von Arbeiter*innen bediente Hantel, deren Hebelarm sich über Gelenke auf den Teller überträgt, sodass das lose Füllmaterial sein Volumen im Vergleich zum gepressten Lehmstein halbiert. Heute gibt es diverse Hersteller, die dieses Prinzip in unterschiedlichen Varianten zur Anwendung bringen. Alle eint, dass der einfache Druck der Arbeiter*innen (circa 50 Kilogramm) durch die Amplifizierung des Hebelarms der Hantel genügt, um einen Druck von mehreren Tonnen (in der Regel circa 15 Tonnen) auf die Lehmerde auszuüben und hochverdichtete Steine zu fertigen. Seit einigen Jahren haben sich neben den manuellen Pressen auch hydraulische etabliert und damit den Grad an Automatisierung und Produktionsleistung weiter erhöht. Wohingegen die manuellen Pressen oft an Baustellen zur Anwendung kommen, die nicht mit Netzstrom oder Generatoren versorgt sind und zur Bedienung ein Team von bis zu zehn Arbeiter*innen benötigt wird, vereinfacht sich das Verfahren bei den hydraulischen Pressen. Hier löst hydraulischer Druck die Hantel der manuellen Pressen ab und ermöglicht es, das Produktionsteam auf fünf Arbeiter*innen zu reduzieren. Gleichermaßen geht mit dem Wechsel vom manuellen zu hydraulischen Pressen ein erheblicher Sprung in der Produktionsleistung einher. Während mit manuellen Pressen circa 0,75 m³ Lehmsteine pro Stunde produziert werden können, erreichen hydraulische Pressen mit circa 5 m³ Lehmsteine pro Stunde ein Vielfaches [Vgl. Diff00].

Ausgangssituation Berlin-Brandenburg

Für die Ausgangssituation für Berlin-Brandenburg kann gesagt werden, dass der Innovationsraum, der bei der Betrachtung internationaler Referenzen identifiziert wurde, legislativ bereits initiiert wurde und aktuell auf eine praktische Übersetzung wartet. Gepresste Lehmsteine als Material des Paradigmenwechsels zur Bauwende fest in der zeitgenössischen Architektur zu etablieren, kann nur funktionieren, wenn dies auch von Seiten des Gesetzgebers befürwortet wird. Während in vielen Teilen der Welt, die Zulassung von Baustoffen nicht zu einem Grad reguliert wird, in dem zwischen CSEBs und CEBs unterschieden werden würde, spielen Normierungen für das Bauen in Deutschland eine wichtige Rolle. Hierbei hat sich die Ausgangssituation für gepresste Lehmsteine durch die im Frühjahr 2023 in Kraft getretene DIN 18940 für tragendes Lehmsteinmauerwerk entschieden verbessert. Im Dreisatz mit den Normen 18945 für Lehmsteine und 18946 für Lehmmauermörtel lassen sich die baurechtlichen Rahmenbedingungen zusammentragen, die (Teil-)Bauwerke aus gepressten Lehmsteinen zusammentragen. Die Normen ermöglichen es außerdem, gepresste Lehmsteine industriell herzustellen und auf dem Baustoffmarkt zu platzieren, ohne dass aufwendige Einzelzulassungen notwendig sind. Für tragend eingesetzte Lehmsteine ist hierzu eine Druckfestigkeit von mindestens 2,5 N/mm² gefordert [vgl. Din18945]. Firmen wie *BC Materials* (Belgien) und *Cycle Terre* (Frankreich) haben bereits gezeigt, dass eine Druckfestigkeit diesen Grades von gepressten Lehmsteinen erreicht werden kann. So weisen gepresste Lehmsteine von *BC Materials* eine Druckfestigkeit von bis zu 4 N/mm² [Bcma00] und gepresste Lehmsteine von *Cycle Terre* sogar eine Druckfestigkeit von 5 N/mm² nach [Cycl00]. Je nach spezifischer Anwendung variieren die Anforderungen an die Steine leicht. Hierzu unterscheidet der Gesetzgeber nach Anwendungsklassen (zum Beispiel tragende Innenwände von beheizten Räumen oder tragende Außenwände von unbeheizten Räumen). Ferner ist eine Festigkeitsklasse des Lehmmauermörtels von mindestens M 2,5 (Druckfestigkeit 2,5 N/mm²) gefordert. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Anschlussdetails für weitere Bauteile (zum Beispiel Sockel, Stürze, Ringanker oder Deckenaufleger) und unter Gewährleistung eines permanenten Schutzes vor Feuchte entsteht für das hiesige Bauen der gesetzliche Rahmen für Bauwerke mit einer maximalen Höhe von 13 m; wobei hiermit das Maß der

Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses gemeint ist (auch bekannt als „Gebäudeklasse Vier“). Bauwerke dieser Dimension sind in Lehmbauweise weder in der Region Berlin-Brandenburg noch übergeordnet in der Bundesrepublik Deutschland realisiert worden. Der vom Gesetzgeber eröffnete Möglichkeitsraum sucht aktuell erste physische Pioniere, die der Theorie ihre praktische Übersetzung nachreichen. Um im Sinne der baugesetzlichen Rahmenbedingungen zu arbeiten, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Lehmbaustoffe in Deutschland nach den anerkannten Regeln der Technik lehmgebunden sind; Zement und auch hydraulischer Kalk dürfen in dieser Hinsicht rein rechtlich kein heimlicher Wegbereiter sein [Vgl VoRö09, S.13].

Ausgangsstoffe in Berlin-Brandenburg

Der Bruch mit der konventionellen Logik zur Gewinnung von Ausgangsstoffen für gepresste Lehmsteine ist eine weitere wichtige Hürde, die genommen werden muss, um die Steine im Sinne der Umweltbemühungen für die Bauwende zu qualifizieren. In der scheiternden Praxis des kapitalistischen Bauens, in der mineralische Rohstoffe lediglich zu den Kosten ihrer Förderung bepreist und missachtend ihrer umweltlichen Auswirkungen abgebaut werden, würde man für die Herstellung von Lehmbaustoffen eigens Frischmaterial im Tagebau abgraben. An ausgewählten Orten, an denen der Boden bereits die richtigen Eigenschaften zur Produktion hat, könnte dieser kostengünstig bis zur Erschöpfung erbeutet werden und anschließend eine neue Quelle identifiziert werden, um die Produktion am Laufen zu halten. So wurden in der Vergangenheit in Berlin-Brandenburg die sogenannten Lehmkaten abgegraben, um aus dem tonhaltigen Boden Ziegel herzustellen. Im großen Stile geschieht dies noch heute für den Abbau der mineralischen Baustoffe Sand und Kies. Damals wie heute zerreißen die Krater der Gruben die örtlichen Ökosysteme, stören den regionalen Wasserhaushalt und nur in den seltensten Fällen lassen sie sich im Nachgang gleichwertig naturalisieren. Es gilt daher zu überprüfen, ob alternative, regionale Ausgangsstoffe für die Lehmsteine identifiziert werden können, die ohne Verursachung derartiger Umweltschäden verfügbar sind und deren Verwendung als Baustoff angemessen ist.

Die genaue Kenntnis des Korngerüsts eines Bodens hilft, diesen hinsichtlich seiner Eignung zum Herstellen gepresster Lehmsteine einzuordnen. Um nachzuvollziehen, welche Zusammensetzung eines Bodens am besten für die Technik des Pressens von Lehmsteinen geeignet ist, wurden die Ergebnisse aus verschiedenen internationalen Forschungsvorhaben verglichen. Die Daten wurden hierzu als genormte Körnungslinien nach DIN EN ISO 14688-1:2020-11 in einem gemeinsamen Graphen abgebildet. Es zeichnet sich ab, dass ein toniger (circa 10-25 % Massenanteil Ton) stark sandiger (circa 55-75 % Massenanteil Sand) Boden als idealer Ausgangsstoff dient. Ebenfalls zu erkennen ist, dass Schluff in allen Referenzen wenig und, dass Kiese und Steine gar nicht, beziehungsweise ebenfalls nur in sehr geringen Mengen, vorhanden sind. Weist ein Boden ein Korngerüst dieser Art nach, ist die Grundlage für einen leistungsfähigen Stein gegeben, der von hoher Druckfestigkeit zeugt und dessen feuchtebedingtes Quell- und Schwindverhalten so optimiert sind, dass der Stein seine Qualität langfristig aufrechterhalten kann [TMPG20]. Letzteres beinhaltet mit Blick auf eine Anwendung im Klima Berlin-Brandenburgs auch eine Frostsicherheit. Der hohe Sandanteil bei gleichzeitig niedrigen Schluffanteil führt zu einem hohen Porenanteil, in dem sich gefrierendes Wasser ausbreiten kann, ohne dass Frosterosionen die Festigkeit des Steins mindern [Mink09, S.27].

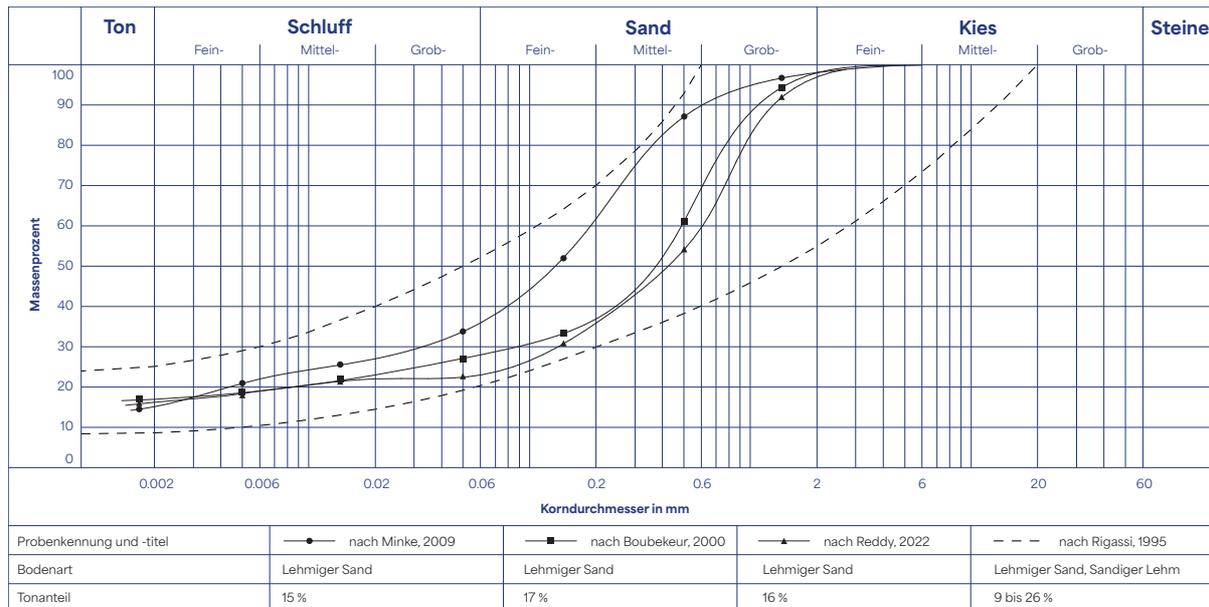


Abbildung 17: Optimales Korngerüst für gepresste Lehmsteine, Gaeth und Kretschmann, 2023

Nebenprodukte

Der Tagebau von mineralischen Baustoffen bringt neben den gesuchten Primärstoffen auch erhebliche Mengen an Nebenprodukten hervor. Diese stellen den ersten möglichen Ausgangsstoff für gepresste Lehmsteine dar. In Gruben in denen Sand und Kies abgebaut werden, sind diese im Raum Berlin-Brandenburg zunächst von einer Schicht Humus, schmälere Übergangshorizonten und nachfolgend von einer Schicht Lehm Boden überdeckt. Die Lehmschichten haben oft eine Stärke von mehreren Metern und können sich als Ader auch in die tieferen Bereiche der Gruben fortführen. Bevor die Erbeutung von Sand und Kies geschehen kann, muss der Lehm Boden abgetragen werden und wird hierzu als sogenanntes Nebenprodukt aus den Gruben verräumt. Nach Stand 2021 gibt es in Berlin-Brandenburg über 100 aktive Gewinnungsstellen von Sand und Kies mit einer Jahresfördermenge von über 12,0 Mio. t. [Elsn22, S.130–149] Zwar fehlt hier eine genaue Bemessung der Menge an Nebenprodukten, jedoch kann aufgrund der oft meterhohen Schichten des aufliegenden Lehm Bodens auch hier eine Fördermenge im Mio.-Tonnenbereich angenommen werden. Ein Vorteil des Nebenprodukts Lehm ist in der Praxis sein großes, homogenes Vorkommen. Wohingegen für kleinteiligere Stoffströme der Aufwand einer ausführlichen Bodenanalyse disproportional zu einer möglichen Anwendung als Lehm Baustoff ist, halten qualifizierte Kubaturen der Nebenprodukte aus dem Tagebau ökonomische wie auch logistische Vorzüge, da sie in größerem Umfang zur Verfügung stehen und eine umfassendere Produktion ermöglichen. Lehm Baustoffe aus Nebenprodukten bedeuteten eine signifikante Alternative zu den konventionellen Baustoffen. Sand und Kies werden in der Regel als Aggregate für die Herstellung von Beton verwendet; einem mineralischen Baustoff, der in Zukunft nur noch in minimalisierter Form verwendet werden darf. Wengleich wohl einige Bauaufgaben gerade im unterirdischen Bereich schwer auf die Verwendung von Beton verzichten können, bieten gepresste Lehmsteine an vielfacher Stelle eine geeignete Alternative. Gerade im Hochbau der niedrigeren Gebäudeklassen – für sich stehend oder im Zusammenspiel mit weiteren regenerativen Konstruktionsweisen – können Lehmsteine die Rolle von konventionell in Beton ausgeführten Wand- und Deckenelementen übernehmen.

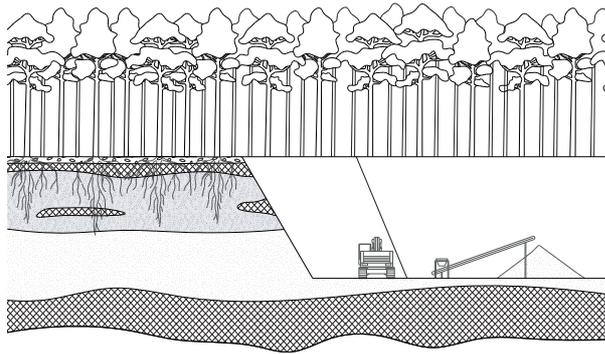


Abbildung 18: Gewinnung von Sand im Tagebau, Gaeth und Kretschmann, 2023

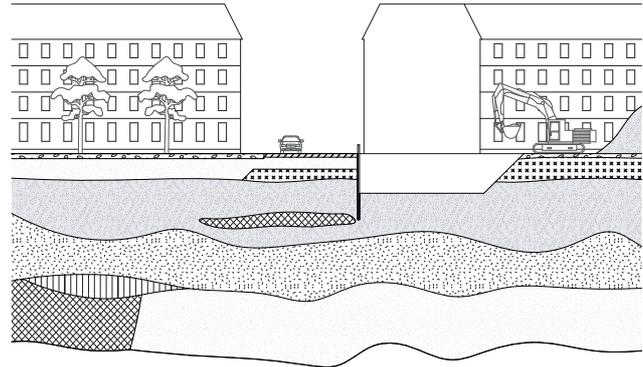


Abbildung 19: Baugrube, Gaeth und Kretschmann, 2023

Aushub

Aushub ist in Deutschland eines der größten Abfallaufkommen und ein weiterer möglicher Ausgangsstoff für gepresste Lehmsteine. 2018 waren knapp 60 % der 218,8 Mio. t mineralische Bauabfälle Boden und Steine [Bund21a]. Wenngleich fast 90% des Materials wiederverwertet werden konnten, floss dieses bei genauerer Betrachtung mehrheitlich in die Verfüllung übermäßiger Abgrabungen. Die tatsächliche Recyclingquote in der Bauindustrie belief sich auf gerade einmal 10,2 % [Bund21a]. Hier dominiert das Recycling von feinen Gesteinskörnungen zur Verwertung im Straßenbau oder als Zuschlag für Beton und Asphalt. Ein Blick auf Berlin zeigt ein ähnliches Bild. In der Hauptstadt entstanden im Jahr 2018 3,8 Mio. t mineralische Bauabfälle, davon waren 1,8 Mio. t Boden und Steine [VoLu19]. 41 % aus der Kategorie Boden und Steine wurde in Brech- und Klassieranlagen aufbereitet und anschließend stofflich in Baumaßnahmen verbaut [VoLu19]. Dabei sind die mineralischen Stoffströme, die vom Menschen für die Architekturproduktion bewegt werden, vor dem Hintergrund der Klimakrise infrage zu stellen. Jährlich werden in Deutschland 550 Mio. t mineralische Baustoffe verbaut, davon allein 240 Mio. t Sand und Kies [Bund21b]. Die 218 Mio. t mineralische Bauabfälle, die jährlich entstehen, werden dann mehrheitlich dafür genutzt, um den durch Abgrabungen für Frischmaterial gelöcherten Boden wieder zu verfüllen. Ein Konsum, der unter keinen Umständen nachhaltig sein kann und immer tiefgreifendere Eingriffe in Boden und Natur fordern wird. Die sich anhäufende anthropogene Masse der linearen Stoffströme muss daher dringlichst zirkulär transformiert werden, um den Druck von den Ressourcen zu nehmen und eine Ausweitung des Tagebaus zu verlangsamen.

Eine genauere Betrachtung der Eigenschaften des deponierten Aushubs eröffnet Möglichkeiten der Wiederverwendung. Der Grund für den Austausch von Boden ist in der Regel seine Bindigkeit, denn bindige (tonhaltige) Böden disqualifizieren sich aufgrund ihrer schlechten Versickerungsfähigkeit, ungleichmäßigen Lastabtragung und fehlenden Eignung als kapillarbrechende Schicht für den Einsatz als Baugrund. Hier sind Sande und Kiese gefordert und der Bestandsboden wird zu Abfall. Als Abfall ist es für den Boden schwer, eine wertige Wiederverwendung zu finden. Aufgrund seiner Tonanteile ist er für die Verwendung in technischen Bauwerken, z.B. im Straßenbau, nicht geeignet. Jedoch ist er in der Regel auch nicht bindig genug, um als Abdeckmaterial eine wasserfeste Schicht in Deponien oder Teichanlagen auszubilden. Auch eignet sich tonhaltige Erde nicht als Zuschlag zu Zement, da Mineralstoffe mit Tonanteil die Druckfestigkeit von Beton vermindern. Gepresste Lehmsteine hingegen stellen einen möglichen Abnehmer dar. Wenn der Abgleich der Korngerüste eines bindigen Aushubs mit der Optimal-Zusammensetzung genügende Schnittmenge darlegt, eröffnet dies dem Abfall eine Verwertung als Lehmbaustoff und vor dem Hintergrund der enormen Volumen der Abfallströme, könnten die neu gewonnenen Baustoffe einen signifikanten Austausch der konventionellen, fossilen Baustoffe anstoßen (dies ist für Aushub und Nebenprodukte gleichermaßen möglich.)

3.5.3. Teil B: Praktische Überprüfung

Aufbau

Die theoretische Abhandlung in Bezug auf die Eignung von verschiedenen Böden zur Herstellung von gepressten Lehmsteinen wurde im praktischen Experiment überprüft. Dazu wurden Lehmsteine mit verschiedenen Tongehältern hergestellt; Grundlage hierzu war die Literaturrecherche, welche einen bestimmten Korridor für ein geeignetes Korngerüst suggerieren. Die Lehmsteine wurden dann nach den Vorgaben der gültigen Normierung geprüft, um herauszufinden wie tonhaltig die Ausgangsstoffe sein müssen, um sich für die Herstellung von gepressten Lehmsteinen zu qualifizieren. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse aus den Steinversuchen, durch Archiveinsicht bei einer führenden, lokalen Ingenieurgesellschaft überprüft.

Durchführung

Ziel war es, ein möglichst breites Spektrum an Tonanteilen abzubilden, dazu wurden Bodenproben von verschiedenen Orten in Berlin-Brandenburg entnommen. Es wurde Bodenproben mit 9 %, 12% und 14% Tonanteil ausgewählt. Um auch das höhere Spektrum der Literaturrecherche abbilden zu können und somit eine allgemeingültigere Aussage über die Zusammensetzung von gepressten Lehmstein treffen zu können, wurde eine Probe mit zusätzlichem Tonpulver auf insgesamt 18 % Tonanteil angefettet (der Ausgangsstoff wies einen Tonanteil von 12 % auf. Es wurde dann reines Tonpulver der Masse hinzugefügt (6,7 % der Gesamtmasse), um den höheren Tongehalt zu erzielen. Das Tonpulver stammt aus der Region).

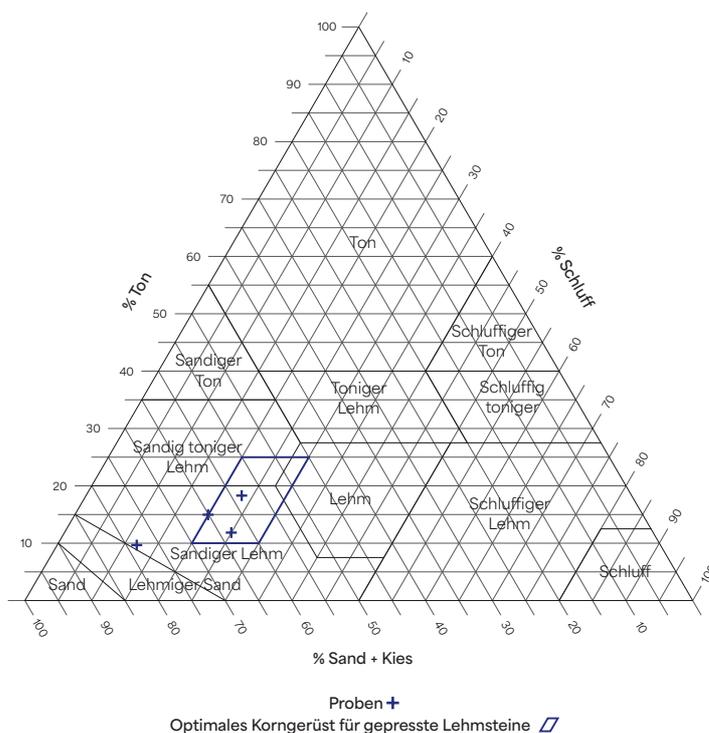


Abbildung 20: Mapping der ausgewählten Böden im Bodendreieck, Gaeth und Kretschmann, 2023

Aus den vier genannten Erden wurden gepresste Lehmsteine hergestellt. Die Herstellung erfolgte in einer manuellen Presse des Herstellers Appro Techno SPRL. Die Leistungskontrolle der Steine für den Einsatz im tragenden Lehmsteinmauerwerk nach DIN 18940 erfolgt nach DIN 18945 für Lehmsteine. Die Eignungsprüfung sowie die Zuordnung zu den Anwendungsklassen erfolgen durch die Ergebnisse aus zwölf Untersuchungen. Zur Qualifizierung der hergestellten Lehmsteine wurden sämtliche Tests durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 05 im Anhang A_23 zusammengefasst.

Bewertung:

Das Experiment zeigt, dass es möglich ist, gepresste Lehmsteine aus Erden aus der Region Berlin-Brandenburg herzustellen, welche sich für den Einsatz als tragender Baustoff qualifizieren. Trotz der sandigen Ausgangsstoffe, welche zum Beispiel zu wenig Ton für die Ziegelherstellung haben, war es

möglich, leistungsfähige Lehmsteine aus den Proben herzustellen. Lediglich die Steine mit einem Tongehalt von 9 %, konnten sich nicht für den Einsatz im tragenden Bauen qualifizieren. Es ist festzustellen, dass es zwar eine positive Korrelation zwischen dem Tongehalt und der Druckfestigkeit gibt, jedoch ist diese nicht ausschlaggebend für die Qualifizierung als tragender Baustoff, solange ein Mindestwert von 12 % überschritten wird. Die Steine aus der Probe mit nur 12 % Tongehalt haben die besten Ergebnisse erzielt. Generell lässt sich sagen, dass alle Steine sehr gut bei den Tests auf das Feuchteverhalten abgeschlossen haben. Dies ist auf den geringen Tongehalt im Vergleich zu anderen Lehmsteinen zurückzuführen. Der Tongehalt scheint ausreichend, um als Bindemittel zwischen den Sandkörnern zu fungieren, jedoch kommt es nicht zu Auffälligkeiten durch Quellen und Schwinden, was bei Baustoffen mit höheren Tongehalten oft der Fall ist. Dadurch, dass Steine mit einem Tongehalt von nur 12 % bereits den Anforderungen von DIN 18940 gerecht werden, können sich viele Ressourcenquellen für die Herstellung von gepressten Lehmsteinen in Berlin-Brandenburg qualifizieren, dies zeigt nicht nur das Experiment, sondern konnte im Gespräch mit verschiedenen Bodengutachter*innen bestätigt werden.

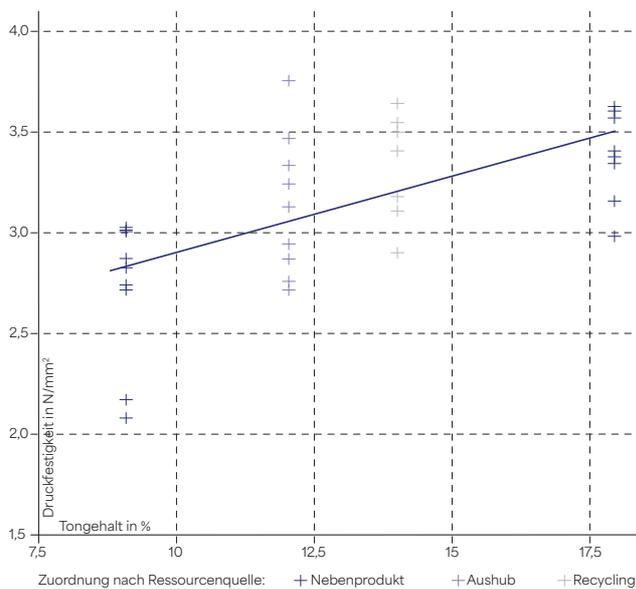


Abbildung 21: Korrelation von Tongehalt und Druckfestigkeit, Gaeth und Kretschmann, 2023

Analyse von Bodengutachten

Auf Nachfrage gewährten Ingenieurbüros mit Fokus auf Bodengrunduntersuchung und Baustoffprüfung Einsicht in ihre Archive. Die Unternehmen führen seit einigen Jahrzehnten Bodengutachten in Berlin und Brandenburg durch und haben Beprobungen für mehrere tausend Bauvorhaben durchgeführt. Ein ausgeprägter regionaler Fokus auf bestimmte Gebiete der Bundesländer war in der Archivarbeit nicht evident. Die Einsicht in Bodengutachten ermöglichte es, stichprobenartig die spezifische Zusammensetzung des Bodens und die zu erwartenden Quantitäten von bestimmten Zusammensetzungen zu bestimmen. Zur Vorauswahl wurden als Parameter festgelegt, dass die Gutachten eine Kubatur von min. 2000 m³ Aushub behandeln, über die eine komplette Aufschlüsselung des Korngerüsts und eine vollständige Schadstoffprüfung vorliegen. Da die Qualifizierung als Baulehm fallspezifisch ist, wird der Prozess der Zulassung erst ab einer gewissen Kubaturgröße wirtschaftlich. Die Größenordnung von 2000 m³ wurde ausgewählt, um zu gewährleisten, dass dies auch bei einer industriellen Produktion der Fall bleibt. Nach Durchsicht der ausgewählten Gutachten, lässt sich festhalten, dass ca. 10 % der Bauvorhaben, welche den Parametern nach Kubaturgröße gerecht werden, eine Bodenbeschaffenheit nachweisen, welche sie nach ihrem Korngerüst und Kontaminationsgrad für die Herstellung von gepressten Lehmsteinen qualifiziert.

Lebenszyklusanalyse:

Um die Leistungsfähigkeit der Steine für das bioregionale, regenerative Bauen abschließend zu bewerten, gilt es auch, die umweltlichen Auswirkungen der Herstellung und des Einsatzes der Steine als Baustoff einzuschätzen. Diese Arbeit legt den Fokus auf das Globale Erwärmungspotenzial (GWP), einem CO₂-

Äquivalentkennwert, welcher nach DIN EN ISO 14025 die durchschnittlichen CO₂-Emissionen eines Baustoffs in der Herstellung bestimmt. Die Herstellung umfasst die Rohstoffgewinnung (A1), den Transport (A2) und die Produktion (A3). Die Angabe erfolgte in kg CO₂ je m³ Lehmsteine. Zwar sind in einer ganzheitlichen Ökobilanzierung weitere Faktoren, wie das Versauerungspotential, das Eutrophierungspotential, und das Potential für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen relevant; jedoch haben andere Studien bereits gezeigt, dass die Produktion von ungebrannten Lehmstoffen kaum messbare Auswirkungen auf die genannten Faktoren haben und daher ein Fokus auf den CO₂-Äquivalentkennwert schlüssig ist [Ward16] [JäHa19, S.75–78]. Die Produktion der Lehmsteinprototypen für das beschriebene Experiment ist dabei nur bedingt aussagekräftig für eine skalierte industrielle Herstellung, denn die Erden wurden ausschließlich manuell verladen, vorbereitet und verpresst. Auch die Trocknung erfolgte in einem unbeheizten Wetterschutz, sodass keine zusätzliche Energie benötigt wurde. Somit wäre für die hergestellten Lehmsteine nur der Transport in einem mit fossilen Brennstoff-betriebenen Fahrzeug zu faktorisieren und würde sich auf nur 2,5 kg CO₂ je m³ belaufen.

Zur besseren Einschätzung wie sich der CO₂-Äquivalentkennwert bei einer Skalierung in einer industriellen Produktion verhalten würde, in der die Bearbeitung der Erde durch Maschinen erfolgt, wurde die in Deutschland geltende Datenbank für Ökobilanzierungen ÖKOBAUDAT konsultiert. Für Lehmsteine ist in der Datenbank ein Wert von 93,64 kg CO₂ je m³ hinterlegt. Dieser Wert ist sehr hoch (vgl. gebrannte Ziegel: 138,4 kg CO₂ je m³, Beton-Mauerstein: 242,4 kg CO₂ je m³), da der in der ÖKOBAUDAT hinterlegte Wert die Trocknung der Steine durch Heizelemente inkludiert. Eine Forschung des Dachverband Lehm e.V. bestätigt diesen Verdacht in einer Studie zu den CO₂-Äquivalentkennwerten (A1-A3) von Lehmputz. Die Forscher*innen finden hier, dass die in der ÖKOBAUDAT hinterlegten Werte, aufgrund des dort berechneten Trocknungsverfahren, um ein Vielfaches höher sind als die in der Realität benötigten Energieressourcen.[ScLe20, S.10] Da dies in der hier angewendeten Herstellungsmethode von gepressten Lehmsteinen nicht notwendig war und auch bei der Skalierung der Produktion nicht notwendig sein wird, sind Daten zu verwenden, welche kein Trocknungsverfahren berücksichtigen. Die ÖKOBAUDAT weist parallel hierzu die Herstellung von Stampflehm, mit einen Wert von 9,35 kg CO₂ je m³, aus. Da Stampflehm auf der Baustelle verarbeitet wird und dies in der Kategorie Herstellung nicht hinterlegt ist, beschreibt der Wert ausschließlich die Unterkategorien A1 und A2 der Ökobilanzierung, sowie das maschinelle Kollern und Mahlen der Ausgangsmaße in A3. Da das Ausgangsmaterial für gepresste Lehmsteine und Stampflehm identisch ist (A1 und A2) und sich lediglich die Produktion unterscheidet (A3), ist der Wert von 9,35 kg CO₂ je m³ ein besserer Ausgangswert für die Einschätzung des GWP von gepressten Lehmsteinen. Zur Komplementierung des CO₂-Äquivalentkennwert muss der Wert noch mit der aufzuwendenden Energie für den Pressvorgang summiert werden. Eine Herstellerrecherche hat ergeben, dass eine elektrisch motorisierte Presse in einer Acht-Stundenschicht 6480 Steine der Größe 295 mm x 140 mm x 90 mm mit 24 kWh produzieren kann. Um einen flüssigen Produktionsablauf zu gewährleisten, muss die Presse mit einem Fließband befüllt werden (8,8 kWh/Schicht); die Lagerung erfolgt manuell. Das entspricht 24,1 m³ Lehmsteinen für einen Energieeinsatz von 32,8 kWh. Das Bundesumweltamt ermittelte für das Jahr 2021 einen Durchschnitt von 485 g/kWh für den in Deutschland produzierten Strommix inklusive sämtlicher Vorketten [IcLa22]. Das bedeutet das für die Produktion von 1m³ gepressten Lehmsteinen circa 1,361 kWh notwendig sind mit einem CO₂-Äquivalentkennwert von 0,660 kg. Summiert mit den 9,35 kg CO₂ aus der Vorbereitung und dem Transport der Erden, erhalten wir einen finalen Wert von 9,95 kg CO₂/m³ für die Herstellung von gepressten Lehmsteinen. Der Wert zeugt, in Zeiten der Klimakrise, von einer zukunftssträchtigen Perspektive für die Lehmsteine, mit einem GWP, welches ein Vielfaches, unter dem der konventionellen Baustoffe liegt. Durch die Verwendung von zunehmend emissionsfreieren Maschinen, sowie dem Bezug von Strom aus ausschließlich erneuerbaren Energien kann dieser Wert weiter verkleinert werden. Da die im Experiment hergestellten Lehmsteine ohne weitere Stabilisatoren hergestellt wurden lassen sie sich ohne weitere Behandlung vollständig wiederverwerten, die Entsorgung der Lehmsteine ist somit CO₂-neutral und hat keinen Einfluss auf die Berechnung des CO₂-Äquivalentkennwert.

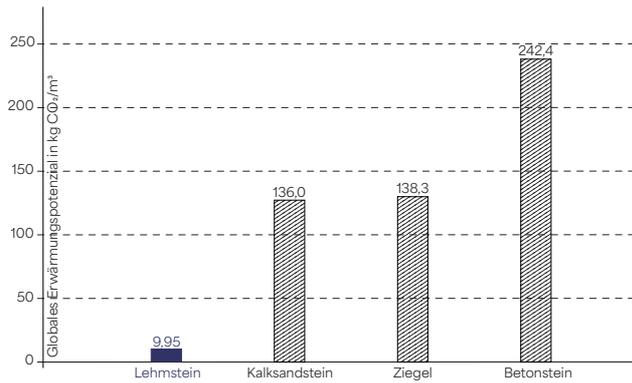


Abbildung 22: CO₂-Äquivalentkennwertvergleich, Gaeth und Kretschmann, 2023

3.5.4. Teil C: Anwendungspotentiale

Nachdem im Experiment ein umfangreiches Verständnis dafür gewonnen wurde, in welchen Quantitäten und mit welchen Qualitäten gepresste Lehmsteine aus den mineralischen Reststoffströmen Berlin-Brandenburgs hergestellt werden können, eröffnet sich nunmehr die Möglichkeit, diese in konkreten Anwendungen zu kontextualisieren. Dies hat stets vor dem Hintergrund der Wasserempfindlichkeit des Lehms zu erfolgen; diese ermöglicht einerseits des Lehms unbegrenztes Recyclingpotential, zum anderen bedeutet es in der Anwendung, das Lehm dauerhaft vor dem Kontakt mit Wasser geschützt werden muss. Insbesondere bei der Verwendung als tragender Baustoff, muss versichert werden, dass die Steine nicht durch Wasserkontakt aufweichen und so eine Einsturzgefahr der Bauwerke entsteht. Nachfolgend zeigen zwei exemplarische Anwendungen den praktischen Einbau von Lehmsteinen.

Tragende Innenwand

Um tragend zu fungieren, müssen Innenwände nach DIN 18940 eine Mindestdicke von 17,5 cm nachweisen. In der untenstehenden Bauteil-Isometrie wurden die Lehmsteine als Sichtmauerwerk ausgeführt. Dies hat in der Nutzung den Vorteil, dass die Lehmsteine zu beiden Raumseiten die Luftfeuchte regulieren können und damit die Aufenthaltsqualität der Innenräume verbessern. Je nach statischer Beanspruchung ist es möglich, durch Rücksprünge im Mauerwerksverband, Raum für die Installation von Wasser oder Strom zu schaffen. So ist es möglich, die Installationen plan mit dem Mauerwerk auszubilden, ohne dieses aufwändig schlitzen und füllen zu müssen. Reduziert sich der statisch relevante Querschnitt durch den Versatz auf unter 24 cm, dürfen die Wände nur noch eine maximale lichte Raumhöhe von 2,75 m haben. Die Lehmsteine bieten eine alternative zu energieintensiven Materialien wie Kalksandsteinen, Ziegeln oder Betonbauteilen und reduzieren ihren ökologischen Fußabdruck zusätzlich, da sie ohne additiven Oberputz oder die Verblendung durch Plattenwerkstoffe eingesetzt werden können [vgl. DIN18940].

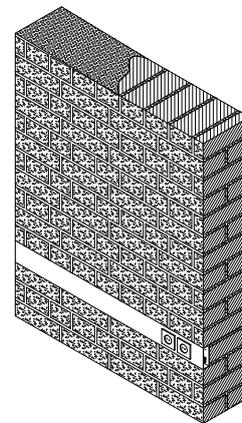


Abbildung 23: Innenwand, tragend, Gaeth und Kretschmann, 2023

Tragende Außenwand, Außendämmung

Die plausibelste Anwendung von tragenden Lehmsteinen, stellen Außenwände von beheizten Räumen mit einer außenliegenden Wärmedämmung dar. In der untenstehenden Isometrie wird die Außenhaut neben der Dämmung durch eine hinterlüftete Holzfassade vervollständigt, wohingegen innenseitig das Mauerwerk sichtbar bleibt. Der konstruktive Witterungsschutz ist somit dauerhaft sichergestellt und gleichzeitig können die Steine ihren Beitrag zur Regulierung des Innenraumklimas leisten. Bei der Auswahl der Dämmstoffe ist darauf zu achten, dass diese im Zusammenwirken mit den weiteren Bauteilschichten der Wand einen Tauwasserausfall innerhalb der Lehmsteine vermeiden. Ein Nachweis über die bauphysikalische Tauglichkeit des gewählten Bauteilaufbaus ist daher unbedingt zu erbringen, sodass die Stabilität der Wand langfristig sichergestellt ist. Neben der bereits zuvor erwähnten Substitution von Kalksandsteinen, Ziegeln oder Betonbauteilen, kann auch Holz ein möglicher Austauschbaustoff für tragende Lehmsteine darstellen. Je nach Verfügbarkeit kann dies den Druck von der Ressource Wald / Holz nehmen und eine gleichwertig regenerative Alternative zu Holzständer- / und insbesondere massivwänden eröffnen.

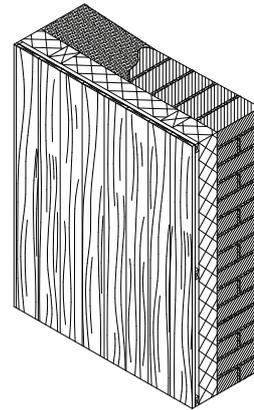


Abbildung 24: Außenwand, tragend, gedämmt, Gaeth und Kretschmann, 2023

Instandhaltung und Pflege

Noch bevor das Recyclingpotential von Lehmsteinen als Ausgangsmaterial für neue Lehmbaustoffe abgerufen werden kann, kann sich bereits während eines Nutzungszykluses der Reversibilität von Lehm bedient werden. Für die Instandsetzung von beschädigten tragenden Lehmwänden erläutern die Lehmbauregeln den Ablauf einer fachgemäßen Reparatur und verdeutlichen die Einfachheit der Vorgangs, der auf dem natürlichen Zusammenwirken von Wasser und Ton beruht:

„Reparaturen müssen baustoffgerecht ausgeführt werden. Zerstörte oder von Salzen durchdrungene Teile werden bis auf die erhaltene Substanz herausgeschnitten und durch Lehmsteinmauerwerk in Lehmörtel ergänzt. Kleinere Fehlstellen können vorgehäst und mit geeignetem Lehmstoff gefüllt werden, größere Wandabschnitte können mit dem Bestand ähnlichen Baustoffen ausgeführt werden. Auf ausreichende Verbindungen durch Nuten, Verzahnung oder Verankerung ist zu achten.“ [RöZi14, S.42]

Der Grad an In-Situ-Reparaturmöglichkeit in Kombination mit dem geringen ökonomischen und handwerklichen Aufwand ist nahezu einmalig. Dieses Phänomen ist dabei nicht auf die Instandsetzung von tragenden Bauteilen begrenzt, sondern lässt sich logischer Weise auch auf kleinere Fehlstellen und oberflächliche Verletzungen applizieren. Räume, die einen ständigen Nutzungswechsel durchlaufen, wie Museen, Klassenzimmer und auch Wohnräume, können davon profitieren, dass zum Beispiel Bohrlöcher in Kürze wieder aufgefüllt und repariert werden können und die Wertigkeit der Oberflächen über Jahrzehnte aufrecht gehalten werden kann.

3.6 Grüne Beschaffung-Prozesssicherung (AP 5)

*Autor*innen Kapitel 3.6: Angelika Drescher (Bauhaus Erde gGmbH)*

Dieses Arbeitspaket stellt eine Begleitforschung dar, die zur **Klärung von Planungsvoraussetzungen** mit Ausblick auf den zukünftigen **dauerhaften Demonstrationsbau** zur Behausung von Kernfunktionen des Bauhaus Erde im Zentrum von Potsdam, insbesondere integrale Entwicklung grundlegender Ansätze für das Nutzungskonzept sowie Prozessklärung hinsichtlich potentieller Konstellationen der Bauträgerschaft, sowie Qualifikationsverfahren für Planungsbeteiligte und regionaler Beschaffung beleuchtet. Im Jahr 2022 wurden zu diesen Themen von Bauhaus Erde zusammen mit der UTB GmbH als Partner aus der gemeinwohlorientierten Immobilienwirtschaft erste Sondierungen vorgenommen.

Über die herkömmlichen Leistungen der Entwicklungsphase hinaus (Machbarkeitsstudie und planungsrechtliche sowie ortsspezifische technische Klärungen) fand mit zusätzlicher Unterstützung aus Fördermitteln der DBU die benannte Begleitforschung statt unter der Leitfrage:

Wie kann unter Wahrung bestehender rechtlicher Rahmenbedingungen und Beschaffungsregeln, eine konsequent auf regionale Produkte (regenerative Baustoffe und Recyclingprodukte) und regionale Kreislaufwirtschaft ausgerichtete „grüne Beschaffung“ in Brandenburg modellhaft konzipiert werden?

Beteiligt an dem Sondierungs-Prozess waren:

- Expert*innen aus der Bauwirtschaft und Planungspraxis,
- Juristische Expertise zum Planungs- und Vergaberecht
- Politiker*innen der Kommunalen-, der Landes- und der Bundes-Ebene
- die Bau- und Stadtplanungs-Verwaltung der Stadt Potsdam
- die Grundstückseigentümerin Stiftung großes Waisenhaus zu Potsdam
- Anrainer*innen im Quartier
- zivilgesellschaftliche Akteur*innen, aus der Nachbarschaft
- Entwurfsseminar der TU Berlin, NBL Masterstudiengang Architektur

Folgende wesentlichen Aspekte der „grünen Beschaffung“ wurden dabei in Kooperation mit diversen Akteur*innen genauer untersucht:

1. Prozesssicherung
2. Nachhaltige Baulandbeschaffung
3. Vorbereitung Konzept für eine frühzeitige Nutzerbeteiligung
4. Empfehlung nächste Schritte und Übertragbarkeit

3.6.1. Prozesssicherung

3.6.1.1 Vergabeverfahren und Konstellation Bauträgerschaft/ Betrieb

Im interdisziplinären Austausch mit Expert*innen aus der Praxis wurden die wesentlichen Aspekte beleuchtet, die im Hinblick auf ein konsequentes und qualitätvolles Bauen mit regional verfügbaren, regenerativen Baustoffen, eine vollständige Dekarbonisierung des Bauzyklus und der langfristigen Rezyklierbarkeit von Bauteilen auf der Prozessebene des Vergabeverfahrens berücksichtigt werden müssen. Nach der Verschaffung eines Überblicks lag der Fokus auf der verdichteten Betrachtung der in Frage kommenden Vergabeverfahren im Zusammenhang mit möglichen Varianten von Bauträgerschafts-Konstellationen.

Die Zwischenergebnisse und Beiträge aus dem interdisziplinären Fachgespräch stehen als Grundlage für die Weiterentwicklung im Prozess zur Verfügung und sind als Anlagen der vorliegenden Dokumentation beigefügt. An dieser Stelle geben wir zusammenfassend einen Überblick zu den wesentlichen Inhalten im Anhang

An dem Fachgespräch am 05.12.2022 nahmen teil:

Klaus Wiechers - Experte Wettbewerbsverfahren (wiechers beck gesellschaft von architekten mbh)

Sarah Lüttges - Expertin Unternehmensentwicklung (UTB Projektmanagement GmbH)

Tom Bestgen - Immobilienkaufmann (UTB Projektmanagement GmbH)

Stefan Rechten - Rechtsanwalt Vergaberecht (Beiten Burkhardt Rechtsanwalts-gesellschaft mbH)

Klaus Mindrup - Diplom-Biologe, Ex MdB

Andreas Rietz - Architekt, Ex-Leiter BBSR Abt. Nachhaltigkeit

Angelika Drescher - Architektin, Projektleitung Prozess (Bauhaus der Erde gGmbH)_Workshop-Leitung

Claudia Bode - Architektin, Projektleitung Design (Bauhaus der Erde gGmbH)

Philipp Misselwitz Architekt, GF Bauhaus Erde (Bauhaus der Erde gGmbH)

Konstellation für die Bauträgerschaft

Wichtig ist die Nachahmbarkeit des Prototypischen Verfahrens, Anwendung und Übertragbarkeit auf weitere Vorhaben. Hierbei ist sowohl der öffentliche Sektor interessant, da ihm eine Art Vorreiterrolle zukommt, als auch der private Sektor, da dies den weitaus überwiegenden Teil der baulichen Investitionen ausmacht, und daher eine Bauwende dort besonders wirksam werden kann. Die zu erwartende Zeitschiene für die Durchführung. Des ProtoVerfahrens wird mitentscheidend sein für die weitere Vorgehensweise. Diese hängt unter anderem stark davon ab, ob und in welchem Maße öffentliche Gelder für die Bauinvestition zum Einsatz kommen, und wie die Bauträgerschaft aufgestellt sein wird. Noch ist offen, ob die Projektierung rein aus Mitteln der öffentlichen Hand durchgeführt werden kann, oder ob eine Private Bauträgerkonstellation mit Einbindung öffentlicher Mittel zum Tragen kommt. Trotz der sehr viel größeren Herausforderungen bei der Verpflichtung zur öffentlichen Ausschreibung, sobald öffentli-che Gelder verwendet werden, scheint es sinnvoll, diese Varianten stärker ins Auge zu fassen. Zumindest wäre damit ein ungleich größerer Lerneffekt und Erkenntnisgewinn aus der Projektierung zu erwarten, da gerade die Überwindung der regulatorischen Hürden im Vergaberecht wesentlicher Erfolgsfaktor für die Scalierbarkeit.

In jedem Fall - ob mit oder ohne Einsatz öffentlicher Gelder – sind für das Gelingen des Experiments gewisse Vo-raussetzungen (spezifische Kriterien) notwendig, die eine Bauträger-Konstellation erfüllen können sollte. Sie sollte in der Lage sein, folgende Herausforderungen anzunehmen:

- Gemeinwohlorientierung
- Praxistest Bauwende (Experimenteller Charakter)
- Kompakter Umsetzungszeitraum (Planung und Bau innerhalb von ca. 4 Jahren)
- Holistischer Ansatz, radikal regional, Fehlerkultur, Dokumentation
- Bei Bauhaus Erde liegt die Zuständigkeit für das Forschungsdesign, sowie die Hoheit über die inhaltliche Prozesssteuerung, insbesondere bzgl. der Kriterien bei Auslobung und Festlegung der Planungsaufgabe

In der Anlage findet sich eine Matrix, die nach der Methode der Unterscheidung in Hardware/ Software/ Orgware die möglichen Varianten der Konstellationen auffächert, indem jeweils mögli-che Rechtsformen mit den Aufgabenfeldern überlagert werden und durch Eintragung konkret benann-ter Akteure unterschiedliche Konstellations-Möglichkeiten sichtbar werden. Hierbei wird gleichzeitig greifbar, welche Rolle die Organisation Bauhaus Erde in Kombination mit Partnern zusammen konk-ret einnehmen könnte. Besondere Hervorhebung finden darin auch die Aspekte der Gemeinwohlori-entierung, welche bei der Bewertung der Varianten eine wesentliche Rolle spielen sollten. Im Workshop wurden die unterschiedlichen Varianten kritisch beleuchtet und mit Hinweisen auf mögliche Stolpersteine und Finanzierungsaspekte ergänzt.

(siehe Anhang: A_24_Matrix Bautraegerkonstellatioinen)

Vergabeverfahren

Das zu entwickelnde ProtoVergabeverfahren im Planungs- und Bauprozess steht unter der Prämisse des möglichst sparsamen und schonenden Umgangs mit Ressourcen (Material, Energie, Fachwissen) und radikaler Regionalität.

Zur Festlegung der Planungsaufgabe sind die Bedarfe und inhaltlichen Ziele seitens der Bauträgerschaft möglichst präzise und Lösungs offen zu formulieren. Entscheidend aber für die Erreichung möglichst innovativer Lösungsansät-ze, die sich dadurch auszeichnen, dass die nicht nur klassische Planungslösungen, sondern auch organisatorische, konzeptionelle strukturelle Lösungswege einbeziehen,

ist die inhaltliche Konzeptionsarbeit. Der Auslobung zum Qualifizierungsverfahren für die Planungsleistungen sollte im Idealfall eine Konzeptions-Werkstatt vorgeschaltet werden, in der die ortsspezifischen Potentiale ausgelotet und programmatische Umsetzungsvorschläge gesammelt werden, die Bedarfe und Ziele berücksichtigen. Die Grundlagenermittlung und Klärung der Machbarkeiten gehört ebenfalls in diese Phase. Die Bauherrnschaft wird auf der Grundlage der Ergebnisse der Konzeptionsphase die Planungsaufgabe definieren und erstellt die Auslobung für ein Qualifizierungsverfahren der Planungsleistungen. Entsprechend der Konstellation von Bauträgerschaft und Finanzierungskonzept sind bestimmte Verfahren und Regelwerke anzuwenden für Vergabe und Ausschreibung.

Im Fachgespräch wird zunächst sondiert, welche der bisher gängigen Verfahren zur Qualifizierung der mit den Planungsleistungen zu Beauftragenden für unseren Zweck in Frage kommen. Hierbei gelten besondere Anforderungen an das Planungsteam. Für die Planungsabläufe selbst gelten von der herkömmlichen Projektierungspraxis abweichende Empfehlungen, die sich aus den spezifischen Anforderungen im Designprozess für eine auf Bauen mit Holz und Nachwachsenden Rohstoffen und Recyclingmaterialien ergeben. Hierzu hat Eike Roswag-Klinge treffend formuliert:

Holzbaugerechte Planungskultur, holzbaugerechte Ausschreibung, Vergabe und Überwachung implementieren

- Planungsteams sollen von der Wettbewerbsphase bis zur Ausführungsphase zusammenarbeiten und nicht durch Ausschreibungs- und Vergabeverfahren getrennt werden. So lassen sich Bauwerke qualitäts-, zeit-, und kostensicherer planen und ausführen. Das gilt insbesondere für den Holzbau, wo Architektur, Baukonstruktion und TGA untrennbar verbunden und integral geplant werden müssen.
- Integrale Planung aus Tragwerk, Konstruktion, TGA und Architektur in kompetenten Planungsteams bevorzugen
- Baubeginn erst nach Abschluss der Planungen

Auf Grundlage einer Vorauswahl durch die Expertise aus dem Teilnehmerkreis wurden im Dialog die Aspekte der verschiedenen Verfahren erörtert, und das Erfahrungswissen aus der Praxis aller Teilnehmenden in einem Brainstorming festgehalten. Besondere Aufmerksamkeit wurde übergeordnet zusätzlich der Prozesssteuerung und Fragen zur Auslobung gewidmet, da hier die größten Weichenstellungen erfolgen. Im Anschluss wurde ein Szenario skizziert.

(siehe Anhänge: A_25_Übersicht Verfahren, A_26_Szenario Verfahren LP0)

Weitere Arbeitsgrundlagen

Darüberhinaus stehen für den weiteren Prozess Vorüberlegungen zu den wichtigen Themen der Nachhaltigkeit aus dem Expertenkreis als Arbeitsgrundlage zur Verfügung, insbesondere zum Aspekt der Suffizienz, deren Verankerung in den Regularien des BUND (BNB) geplant ist.

(siehe Anhang: A_27_Nachhaltigkeit auf allen Ebenen_Impuls Rietz)

3.6.1.2 Genehmigungs-Abläufe, Kooperation Verwaltung-Bauträgerschaft

Beispielhaft für eine innovative ressourcenschonende Bearbeitung der genehmigungsrechtlichen Belange, insbesondere für zeitgemäße Bauprojekte, die unter Berücksichtigung der planetaren Grenzen noch nicht durchgehend marktübliche Produkte und Bauweisen stärker einsetzen, kann ein kooperativer Genehmigungsprozess ähnlich aussehen, wie es die Stadt Potsdam mit Bauhaus Erde für den temporären Forschungspavillon im Vorfeld für das zukünftige Bauverfahren bereits erprobt:

Die genehmigungsrechtlichen Abstimmungen erfolgen grundsätzlich am runden Tisch unter Einbeziehung aller zu beteiligenden Stellen und Fachbereiche, sofern diese nicht anwesend sein können oder müssen, sind sie kompetent vertreten durch andere Verwaltungseinheiten. Für kleine Bauvorhaben reicht es in der Regel aus, etwa drei runde Tische einzuberufen, wenn der Prozess im Weiteren in enger Absprache mit der zuständigen Sachbearbeiterin unter Ermöglichung von Direktabsprachen mit den beteiligten Fachämtern für einzelne Detailrückfragen stattfinden kann. Die drei runden Tische gliedern sich für dieses Vorhaben wie folgt:

1. Runder Tisch:

- Antragskonferenz Vorabstimmung
- 2. Runder Tisch:
Antragskonferenz Einreichung
- 3. Runder Tisch:
Ressorübergreifende Konferenz zur verlässlichen Vollständigkeitsprüfung Bauantrag,
Direktabklärungen

3.6.2. Nachhaltige Baulandbeschaffung

Das derzeit in Aussicht stehende Baugrundstück für den dauerhaften Demonstrationsbau soll auf Basis eines Erbbaurechts genutzt werden – ein Instrument nachhaltiger strategischer Bodenvorratspolitik und Baulandbeschaffung. Trotz des großen Interesses von Kommunen und öffentlichen Eigentümerschaften gibt es bislang noch wenig praktische Erfahrung für den Einsatz dieses Instruments speziell im Zusammenhang mit nachhaltiger Projektierung unter dem Vorzeichen der Bauwende.

Budgetierung, Ausnutzung, Flächenkalkulation

Zur Aufstellung und Akquise einer nachhaltigen gemeinwohlorientierten Projektträgerschaft im Sinne einer Investitions-Partnerschaft ist die Projektskizze mit Kostenkalkulation notwendig. Diese wurde mit Unterstützung der Forschungspartner UTB auf Grundlage der mit den Kennzahlen der städtebaulichen Rahmenbedingungen unterlegter Flächenermittlung erstellt, und nach dem Erfahrungswert gemäß aktueller Marktlage prognostiziert, soweit dies möglich ist (siehe Anhänge: A_28_BE EZB Factsheet, A_29_EZB_Flaechenkalkulation)

Offen bleibt bislang noch, in welcher Konstellation die Bauträgerschaft sich letztlich zusammensetzen wird. Dies wird sich unter anderem in abhängig vom Finanzierungsmodell, sowie von den politischen Anreizen und Vorhaben entscheiden.

Derzeit liegt die Projektskizze beim Bundesministerium für Bauwesen vor mit Antrag zur Aufnahme in den Haushalt 2024. Das „Epizentrum Bauwende Potsdam“, projektiert und mit angewandter Forschung begleitet durch Bauhaus Erde eignet sich als Demonstrations-Objekt mit Vorreiterrolle des Bundes für eine klimagerechte Bauwende zur Erreichung der ehrgeizigen Zielsetzungen im Bausektor.

Erarbeitung von schrittweisen Verbindlichkeiten zwischen Grundstückseigentümerschaft und Bauvorhaben-Trägerschaft

Bauhaus der Erde legte in Rücksprache mit dem Vorstand der Eigentümerschaft sehr frühzeitig einen Entwurf für eine gegenseitige Absichtserklärung vor, und zeichnete damit einen Weg vor, der schrittweise zu immer höheren Verbindlichkeiten führen soll. Eine Annäherung an ein Vorhaben mit sehr vielen Unwägbarkeiten verlangt eine starke Vertrauensbasis, die unterstützt werden kann durch schriftliche Verabredungen, auch wenn diese in der Entwicklungsphase keine Vertragsgrundlagen im Sinne einer juristische Einklagbarkeit haben können. Der vorgelegte Letter of Intend (LOI) wurde zwar nie unterzeichnet, diente dennoch den beiden Parteien als Leitfaden und ermöglichte Orientierung über die wichtigsten Eckpunkte und, Annäherung an weitreichend unbekanntere Instrumente der Immobilien-Bewirtschaftung, wie zB das Erbbaurecht.

Konkretisierung erfolgte insbesondere durch die dem LOI-Entwurf beigefügten Unterlagen: Aktuelle Entwurfsplanung zum Pavillon, Entwurfstext und Eckpunktepapier zu einem Erbbaurechtsvertrag (siehe Anhang: A_30_ANL1-LOI_220608 BE und Vorhaben EZB).

Erbbaurecht

Das Erbbaurecht ist ein passendes Instrument zur Überlassung von Boden an eine Nutzerschaft, die in eigener Verantwortung und auf eigene Rechnung, jedoch zu einem ganz bestimmten Zweck langfristig ein Grundstück bewirtschaften möchte. Geradezu ideal im Sinne einer langfristigen gemeinwohlorientierten Bewirtschaftung von Boden ist die Konstellation einer gemeinnützigen Grundstückseigentümerschaft, die über das Erbbaurecht eine inhaltliche Zweckbindung und gleichzeitig die Spekulation mit dem Grundstück ausschließt. Für die Erbbaurechtsnehmerschaft stellt eine solche Absicherung eine willkommene Garantie der Gemeinwohlorientierung dar, die ansonsten nur durch Selbstverpflichtung erhalten werden kann, jedoch schwerlich eine dauerhafte Absicherung struktureller Art findet.

Das Eckpunktepapier zum Erbbaurechtsvertrags-Entwurf bildet einen umfassenden Ausblick auf alle sowohl formal als auch verhandlungstechnisch zu klärenden Punkte, die das gemeinsame Vorhaben fordert. Eine Klärung zur Teilbarkeit des Grundstücks ist frühzeitig notwendig, da dies in der Regel Voraussetzung für die Einrichtung eines Erbbaurechts ist. Nach ersten Betrachtungen scheint eine Abtrennung eines eigenen Grundstücks rein räumlich an dieser Stelle umsetzbar. Die Mindest-Größe eines zukünftigen Erbbaurechts-Grundstücks konnte grob ermittelt werden, und dient als Grundlage für die Kostenkalkulationen (siehe Anhänge: A_31_ANL2-LOI_220608_EBRV-Eckdaten, A_32_ANL2-LOI_220608_EBRV-Textgeruest, A_33_ANL2-LOI_220608_Skizze Grundstückszuschnitt).

Verbindlichkeit durch Beschluss Stiftungsrat StgWP

Die sich anbahnende Kooperation zwischen Bauhaus Erde und der Stiftung großes Waisenhaus zu Potsdam wurde vom Stiftungsrat wohlwollend unterstützt und mit einem Beschluss im Juni und einem bekräftigenden Votum im November 2022 in der Beschlusslage festgeschrieben (siehe Anhänge: A_34_Auszug Beschlussprotokoll Stiftungsrat, A_35_Auszug Beschlussprotokoll Nov 2022 Stiftungsrat).

Mietvertrag für temporären Forschungspavillon

Die erste vertragliche Verbindlichkeit zwischen Bauhaus Erde und der Stiftung großes Waisenhaus zu Potsdam soll ein Mietvertrag über den Grundstücksteil darstellen, der für eine temporäre Bespielung an Bauhaus Erde überlassen werden soll. Dies mag als Gelegenheit betrachtet werden, eine Art „Testlauf“ für die notwendige Vertrauensbasis“ durchführen zu können, die für ein gut Funktionierendes gemeinwohl-ambitioniertes Erbbaurechtsverhältnis von Vorteil sein wird. Der Vertrag soll eine Bauerlaubnis enthalten, und die Mitnutzung zentraler Infrastruktur sichern, die dafür notwendig ist. Dazu wird seitens der Stiftung die Freimachung der Fläche vorbereitet: die Verlegung des Müllstandortes wird projektiert, und die Umlegung der Parkplätze ermöglicht.

Die Anmietung des Grundstücks ist ein wichtiger Meilenstein für Bauhaus Erde, da eine erste bilaterale Verbindlichkeit mit Rechten und Pflichten hergestellt wird, die das Vorhaben an diesem Ort absichern hilft. Die enge Einbeziehung der Eigentümerin bei der Kommunikation mit der Baubehörde ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für das notwendige Vertrauensverhältnis. Die Eigentümerin gibt mit ihrer Formular-Unterzeichnung gegenüber der Behörde ihr Einverständnis mit der Planung des Bauhaus Erde.

3.6.3. Vorbereitung Konzept für eine frühzeitige Nutzer*innenbeteiligung

Einbettung ins Quartier

Der Standort scheint nicht nur hinsichtlich der innerstädtischen Lage besonders geeignet für das Vorhaben, sondern auch aufgrund der besonderen Zusammensetzung sowohl der unmittelbaren Nachbarschaft auf dem Grundstück, als auch in der näheren Umgebung. Die räumliche Nähe in hoher Dichte zu wichtigen Akteur*innen der Potsdamer Kultur- Politik- und Verwaltungs-Landschaft sowohl der kommunalen als auch der regionalen und Landes-Ebene bietet viele Anknüpfungspunkte für Kooperationen sowie konstruktiven Auseinandersetzungen. Es wird viele Anlässe und Gelegenheiten geben, die öffentliche Aufmerksamkeit zu wecken und auf den Ort hin zu lenken.

Die wichtigsten Akteure im Quartier seien hier kurz benannt:

- Rechenzentrum: Soziokultureller Standort und DDR-Baukultur der 70er Jahre
- Garnisonkirche: Auseinandersetzung mit der Geschichte und Praxis der Rekonstruktion
- Kulturquartier an der Plantage: aktueller Stadtentwicklung
- Haus der Brandenburg-Preußischen Geschichte: Kultur im Wandel
- Stiftung großes Waisenhaus zu Potsdam: fortgeführte gemeinwohlorientiertes Stiftungswesen mit langer Tradition am Ort
- Ministerien des Landes Brandenburg: MLUK, MWFK, MSGIV
- Haus der Natur: diverse Umweltorganisationen und -Verbände unter einem Dach
- Voltaire-Schule: für ihre stadtoffenen Unterrichtsformate bekannte Einrichtung

Akteur*innendialog

Anfang Dezember 2022 führte Bauhaus Erde mit der Stiftung großes Waisenhaus zu Potsdam zusammen ein Anrainer*innentreffen durch, um das gemeinsame Vorhaben erstmals an die unmittelbar betroffenen Nachbarn offiziell zu kommunizieren und gleichzeitig eine Einführung in die Thematik zu geben, die in den kommenden Jahren an diesem Standort öffentlich diskutiert werden soll.

Der Fokus lag auf dem gegenseitigen Kennenlernen, Neugierigmachen und Sensibilisierung für die Selbstwahrnehmung als an der weiteren Entwicklung aktiv Beteiligte. Die Veranstaltung selbst nutzte die örtlichen Raumreserven und Bauhaus Erde machte erste praktische Erfahrungen in der Kooperation mit der Nachbarschaft am Ort.

Deutlich wurde, dass weitere ähnliche Treffen folgen müssen, da ein hoher Bedarf an transparenter Kommunikation besteht, nicht zuletzt, weil einige der Beteiligten auf verschiedenen Ebenen mit dem Bauhaus Erde verbunden sind. Gerade darin liegt die große Chance einer Ebenen-Übergreifenden Diskussion und Wahrnehmung der Thematiken. Es sei daher besonders verwiesen auf die in der Anlage befindlichen Anwohner*innen-Steckbriefe (A_36_Anrainertreffen_TN Steckbriefe), die anlässlich dieses Treffens zusammengestellt wurden.

Planungsideen für langfristige Entwicklungen

Die Ergebnisse der Grundlagenermittlungen konnten als Rahmen für ein studentisches Entwurfseminar im Masterstudiengang Architektur der TU Berlin genutzt werden.

Es entstanden dabei sehr anschauliche Themenreportagen zu sozioökonomischen, klimarelevanten, stadträumlichen und quartiersbezogenen Aspekten. Für alle diese Ebenen müssen in der zweiten Phase bei einer späteren Auslobung zum Planungswettbewerb in einer Weise, die den Anliegen des Bauhaus Erde angemessen ist, Zielformulierungen erarbeitet werden. Insofern bot es sich an, als ersten Schritt einer behutsamen Annäherung an diese Themen, die studentischen Ergebnisse mit der Anrainer*innenschaft zu diskutieren. Dies erfolgte sowohl im Rahmen des Anrainer*innentreffens, als auch einer Mehrtägigen Begleitausstellung in den Räumen des benachbarten Rechenzentrum und dazugehöriger Finissage unter Beteiligung der interessierten Stadtgesellschaft.

Fünf sehr unterschiedliche Entwurfsansätze zeigten eine große Variantenbreite möglichen städtebaulichen Umgangs mit den von Bauhaus Erde gesetzten Planungs-Kriterien für ein Bauwende-Demonstrationsprojekt.

- „REALLABOR BAUWENDE“: Umnutzung Bestehender Bausubstanz, Verzicht auf einen Neubau, Ausstrahlung ins Quartier durch verbindende Grünachse
- „A WÄRM NESS“: Ein erzählendes Haus, das in seiner Formensprache die Aufmerksamkeit auf einen nachhaltigen effizienten Umgang mit Energieverbrauch und -Gewinnung richtet, durchdacht bis zum Betriebsmodell/ Nutzungsverhalten, wobei sich direkte Effekte auf innovative Formen des sozialen Zusammenlebens unmittelbar damit verbinden.
- „Muse Umdenken“: Ein transparent erschlossenes Kompaktes und doch luftiger Holzbau, als einladendes durchlässiges Tor zwischen Innen und Aussen, Haus und Stadt das in einen programmatisch didaktischen Parcours in das Quartier eingebunden wird und Bezüge zur Thematik im städtischen Raum erfahrbar macht.
- „Wissenspeicher Bauwende“: ein konstruktiv durchdachter Holzbau mit minimiertem Materialeinsatz, der den Aussenraum über die Grundstücksgrenzen hinweg als ebenso Raumbildendes Element einbezieht.
- „AGE OF BAUHAUS EARTH“: Als baugeschichtlich architekturtheoretische Auseinandersetzung mit dem Ansatz des zeitgenössischen Philosophen Bruno Latour wurde „das Terrestrische“ von der Entwurfsgruppe aktiv erforscht und in der Brandenburg - Region an symbolhaften Realorten gesucht und gefunden.

(siehe dazu Anhänge: A_37_NBL Entwurfseminar EZB)

Auf der Website des Studiengangs findet sich eine Übersicht und Erläuterungen zu den Entwurfsansätzen, bei Bedarf können die Entwurfsverfasser noch weiterhin über die TU Berlin kontaktiert werden, und stellen gern ihre Unterlagen zur Verwendung in der weiteren Auseinandersetzung mit dem Ort bereit. <https://www.nbl.berlin/projects/epizentrum-bauwende-urbaner-holzbau-in-potsdam/>

3.6.4. Empfehlung nächste Schritte und Übertragbarkeit auf andere Bauvorhaben

Zur Bauwende gehört das Beschreiten neuer Wege auf der Prozess- und Verfahrensebene, sowie die anhaltende Stärkung einer Kultur des eigenverantwortlichen Handelns aller Beteiligten bis hin zur Nutzerschaft durch frühzeitige Einbindung ebenso wesentlich dazu, wie die in den weiteren Arbeitspaketen des Projektes behandelte Entwicklung von regionalen biobasierten Bauprodukten und Materialströmen, und eine Ressourcenbewusste Planungskultur.

Anhand der unterschiedlichen Entwurfsansätze wurde deutlich, dass die Entwicklung einer verdichtenden baulichen Ergänzung mit einem dem Ort entsprechenden Raumprogramm unter Nutzung bereits vorhanden Potentiale am zielführendsten von Anfang an auf der gesamten Quartiersebene zu entwickeln ist. Dabei sind folgende Themen besonders herauszustellen:

Stabile Quartiere

Nachhaltige urbane Quartiersstrukturen zeichnen sich dadurch aus, dass sie über stabile soziale Strukturen auch langlebige Nutzungen und hohe Ausnutzung vorhandener Ressourcen als lebendige wandlungsfähige Lebens- und Arbeitskultur entwickeln. Die Aspekte der Entscheidungshoheiten und Handlungsrahmen der bewirtschaftenden Akteur*innen und -gruppen sind dabei wesentlich. Baulicher Eingriff und Ansiedlung neuer Nutzer*innengruppen geben Anlass, bestehende Infrastrukturen neu zu organisieren. Insbesondere unter dem Aspekt der Raum-, Ressourcen-, und Materialknappheit und der nicht ausreichenden Möglichkeiten regulativer Instrumentarien sind im Sinne der Nachhaltigkeit Wege der gemeinsamen Absprachen zu suchen, Wege des Teilens von Ressourcen, der Mehrfachnutzungen, der robusten baulichen Infrastruktur für zeitlich und räumlich langfristig wandelbare Nutzungen.

Bei aller Bemühung um ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung im Gebäudesektor wird auf Bundesebene dennoch Neuland betreten, wenn es um Aspekte der Prozesssicherung bzgl. Suffizienz geht (siehe Ergebnisse aus dem Verfahrens-Workshop). Hier ist noch erheblicher Forschungsbedarf festzustellen.

Gemeinnützigkeit im Umgang mit Boden und Immobilien

Nachhaltige Baulandbeschaffung und Aspekte der Gemeinnützigkeit in Bauträgerkonstellationen sind grundlegende Werkzeuge, um hier neue Wege zu etablieren. Gleichzeitig werden dabei Themen der Bodenpolitik, der Landnutzung und Nutzungskonkurrenzen berührt, die das Eigentumsrecht betreffen, reguliert im Sinne des Gemeinwohls über Bau- und Planungsrechtliche Verordnungen, welche jedoch auch wirtschaftliche Interessen nicht unbeachtet lassen können. Entsprechende Regelungen lassen sich nur ansatzweise über Regularien und auf Norm- oder Gesetzesebene verankern, da meist verschiedene Ebenen beteiligt sind und unterschiedliche Rechtsbereiche ineinandergreifen müssen.

Frühe Einbindung aller Akteur*innen

Schritte der weiteren Umsetzung unter Einbindung aller Akteur*innen sind die detaillierte Ausarbeitung eines integrierten Raumprogramms, dessen organisatorische und räumliche Einbettung und Synergien im Quartier, sowie vertiefte Bedarfs- und Potentialanalyse vor Ort. Ein geeignetes Werkzeug hierfür kann eine Konzeptions-Werkstatt zur Erarbeitung der planerischen Aufgabenstellung, auf deren Grundlage die Auslobung für einen Planungs-Wettbewerb mit spezifisch formulierten Nachhaltigkeits-Kriterien erarbeitet werden kann.

Angepasste Verfahrensweisen

Gewisse Öffnungsklauseln im Umgang mit den bestehenden Normen und Gesetzen müssen Möglichkeiten der Verantwortungsübernahme durch die Betreibenden, Bewirtschaftenden, Nutzenden zulassen, um der bestehenden Problematik der sich teilweise widersprechenden Zielsetzungen zu begegnen. Im weiteren Prozess der Umsetzung des Demonstrationsprojektes wird es entsprechende Verabredungen zwischen Bauträgerschaft, Verwaltung und Politik geben müssen, die prototypisch angepasste Verfahrensweisen für eine Übertragbarkeit auch auf andere Projektierungen austesten werden.

3.7 Partnernetzwerk, Öffentlichkeitsarbeit (AP 6)

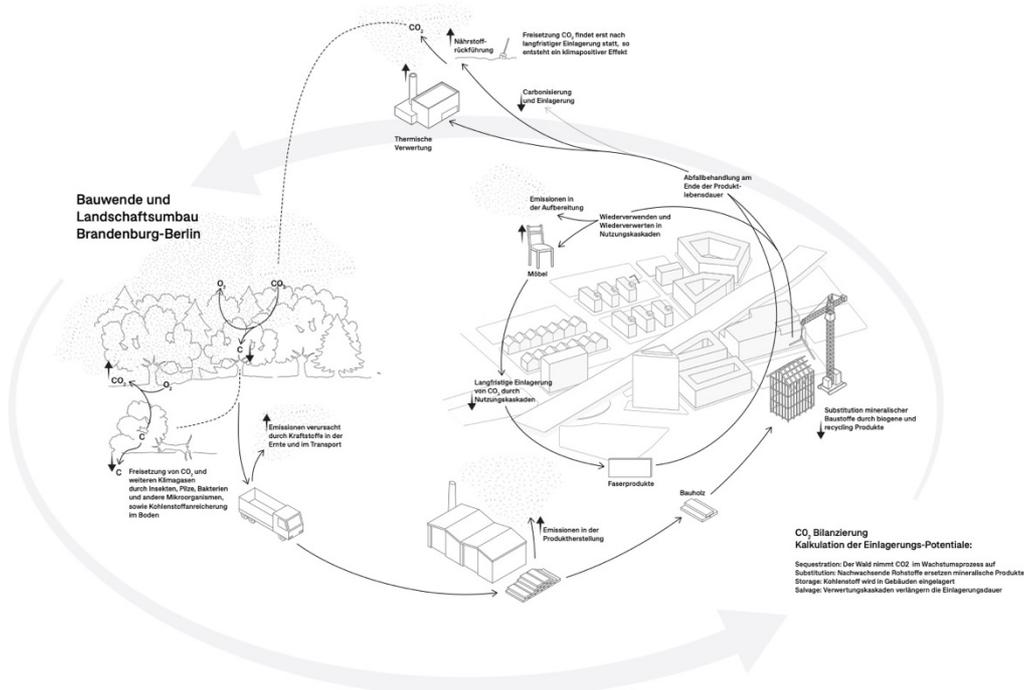
*Autor*innen Kapitel 3.7: Bauhaus Erde gGmbH*

Die wesentlichen Aktivitäten hinsichtlich Platzierung des Projekts in Vorträgen, Fachrunden, Interviews und Presse, Social Media und Onlineauftritt, sowie eigens initiierte Veranstaltungen sind ebenfalls in Listenform dokumentiert und im Anhang A_33_Auflistung Presse zu finden.

4. Fazit und Handlungsempfehlungen

Autor*innen Kapitel 4: Claudia Bode, Angelika Drescher (Bauhaus Erde gGmbH)

Das Projekt Epizentrum Bauwende hat gezeigt, dass die Rahmenbedingungen für ein klima- und kreislaufgerechtes Bauen in den Grenzen einer Ressourcenregion nur durch das Zusammenwirken einer Vielzahl von Akteur*innen entwickelt werden können: Beiträge aus der Wissenschaft sind erforderlich, um globale und lokale Zusammenhänge aufzuzeigen, Potentiale zu qualifizieren und Parameter, wie Einsparpotentiale von CO₂, zu quantifizieren. Forschungs- und Innovationsleistungen zur Entwicklung von skalierbaren technischen Lösungen für eine optimale Nutzung und Verarbeitung bio-basierter Materialien und Abfallprodukte müssen durch Industrie, bzw. Wissenschaft-Praxis-Partnerschaften erfolgen. Gleichzeitig benötigt es willige Kooperationspartner*innen in Politik und Verwaltung, die offen sind neue Wege in Zertifizierung, Regulierung und Beschaffung zu bestreiten, damit die notwendigen regulativen und finanziellen Rahmenbedingungen entstehen, um bio-basierte Materialien und Recyclingprodukte konsequent in Neubau und Umbau einzusetzen. Auch in der konkreten Umsetzung ist die Vorbildwirkung der öffentlichen Hand ein entscheidender, noch zu wenig genutzter Faktor bei der Durchsetzung neuer Bauweisen. Um die Erwartung einer Beispielwirkung öffentlicher Bauträger Planer*innen und ausführende Gewerke müssen sich verstärkt mit regenerativen Materialien und zirkulären Bauweisen auseinandersetzen. Um die Hindernisse, entlang der gesamten Wertschöpfungskette für regenerative und wiederverwendete Materialien, die größtenteils eher kultureller, rechtlicher, wirtschaftlicher und politischer als technischer Natur sind rasch abzubauen, braucht es eine „Koalition der Willigen“, die politische und regulatorische Akteur*innen umfasst.



Folgende Handlungsempfehlungen lassen sich aus den Projektergebnissen ableiten:

1. **Durch die Stärkung der lokalen Verarbeitungs- und Lieferketten für regionale regenerative und biobasierte Materialien (einschließlich gepresster Lehm) lassen sich Dekarbonisierungseffekte im Bauen mit sozialen, ökonomischen und ökologischen Effekten durch klimagerechten Waldumbau und -bewirtschaftung verbinden.**

Mögliche Maßnahmen:

- a. Regulatorische und wirtschaftliche Hindernisse, die Innovationen in den Lieferketten für lokale nachwachsende Rohstoffe behindern sollten abgebaut werden, z.B. durch

- i. die Einführung von beschleunigten Zertifizierungsverfahren und finanzieller Unterstützung für die Entwicklung von Bauprodukten aus lokalen Materialien, die ein hohes Skalierungspotenzial haben;
 - ii. die verstärkte Vernetzung innerhalb lokaler Lieferketten, z. B. durch Kooperationsvereinbarungen zwischen Rohstofflieferanten und Produktherstellern oder zwischen lokalen Clustern kleiner Produzenten;
 - iii. die verstärkte politische und finanzielle Unterstützung für Agroforst-Initiativen, die die bestehenden Netzwerke in diesem Sektor instrumentalisieren;
 - iv. die Einbindung der Akteur*innen entlang der gesamten Lieferkette in Zertifizierungs-/Normierungsprozesse.
- b. Hemmnissen für die Verarbeitung vielfältiger Baumarten in Brandenburg, insbesondere von Laubhölzern für den Baubereich sollten abgebaut werden, z.B. durch
- i. die Anpassung/Erweiterung der Normen für den Baubereich, um eine größere Vielfalt an regionalen Baumarten, einschließlich Kiefer und Laubhölzern, einzubeziehen. Lokale Unternehmen in diesen Prozess einbinden;
 - ii. die Anpassung der Sortierung und Klassifizierung von Holz, um eine effizientere Nutzung des Baumes zu ermöglichen und die Möglichkeiten für "minderwertiges" Holz zu erweitern;
 - iii. die Schaffung finanzieller Anreize, die es bestehenden und neuen Unternehmen ermöglichen, sich auf neue Prioritäten einzustellen (z. B. Nachrüstung von Maschinen, die die Verarbeitung einer breiteren Palette von Baumarten, insbesondere von Laubholz, ermöglichen).

2. Eine Verbreitung und Skalierung von kreislaufgerechten (Um)bauens setzt die Schließung der Lücken zwischen der theoretischen und der praktischen Recyclingfähigkeit von Materialien und Bauteilen aus nachwachsenden Rohstoffen und Abfallprodukten, sowie den Abbau von Hindernissen für die Umsetzung in Planung und Bau voraus.

Mögliche Maßnahmen:

- a. Die Qualität und Quantität von Materialien/Bauteilen, die für die Wiederverwendung verfügbar sind kann durch folgenden Maßnahmen erhöht werden:
 - i. Schaffung von finanziellen Anreizen, die die sortenreine Trennung von Materialien fördern;
 - ii. Miteinbeziehen von End-of-Life-Accounting in alle Bauprojekte und Materialien (Spezifikationen/Ausschreibungsunterlagen sowie Design);
 - iii. Verstärkte Vernetzung der relevanten Akteur*innen, z. B. durch die Einrichtung einer zentralen Datenbank, die Abriss (Materialangebot) und Bau (Materialnachfrage) miteinander verknüpft.
- b. Durch die Einrichtung einer speziellen "Task Force" könnten Lösungen für wirtschaftlichen und rechtlichen Hindernisse, die der Verwendung wiederverwendeter Materialien aus lokaler Produktion bei Planung und Bau entgegenstehen entwickelt werden. Dabei gilt es Folgendes zu berücksichtigen:
 - i. Haftungsfragen (für Herstellende, Bauherr*innen, Planende und Bauunternehmer*innen).
 - ii. Logistikprobleme, einschließlich Lagerung, Zertifizierung und Transport von Materialien;
 - iii. Kenntnisse über "design for disassembly"- Strategien unter Architekt*innen und Ingenieur*innen (siehe unten);
 - iv. Anpassung der Projektphasen und der Finanzierung (und damit verbundene Vorverlagerung von Finanzinvestitionen);
 - v. Regulatorische Fragen, einschließlich der Zertifizierung von wiederverwendeten Materialien und der Integration einer vollständigen Lebenszyklusbilanz in die Ausschreibung.

3. **Nur durch eine Steigerung der Nachfrage nach lokalen regenerativen und wiederverwerteten Bauteilen und Materialien kann eine wirtschaftliche Grundlage für eine bio-basierte, regionale Kreislaufwirtschaft entstehen.**

Mögliche Maßnahmen:

- a. Verbreitung von Kenntnissen über technische (z.B. Design-for-Disassembly) oder Phasen-/Projektmanagement-Strategien bei Architekt*innen, Ingenieur*innen und Bauherr*innen, z.B. durch Partnerschaften mit Berufsverbänden, um Weiterbildungskurse anzubieten.
- b. Entwicklung von Weiterbildungskursen für Stadtverwaltungen und Aufsichtsbehörden.
- c. Proaktive Identifizierung und Behandlung potenzieller Landnutzungs- und anderer Konflikte zwischen Sektoren (z. B. Jagdgesetze)
- d. Förderung von Innovationen durch finanzielle Unterstützung von Experimental- und Demonstrationsprojekten, die z.B. folgendes untersuchen:
 - i. Ausweitung der Anwendungen für wiederverwendete Materialien, z. B. Erhöhung des Anteils von wiederverwendetem Holz bei der Herstellung von Spannplatten.
 - ii. Experimentelle/prototypische/demonstrative Design-Ideen, wie sie in diesem Projekt entwickelt wurden (Haus der Materialisierung-Prototypen, lokal beschaffte komprimierte Erdblocke)

Literaturverzeichnis

3. Einleitung

[UNDESA2018] UN. Population Division: The World's cities in 2018: data booklet, UN 2018

[IEA & UNEP2019] International Energy Agency and the United Nations Environment Programme: 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, United Nations Environment Programme, 2019

[WBGU2016] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Hauptgutachten Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte, WBGU, 2016

3. Hauptteil

3.1 Potentialanalyse regional verfügbarer regenerativer Baumaterialien (AP 1)

[Agro-V] Agromas: *Flachserträge in Europa im Jahr 2020 - Ertragsstatistik*. URL: <https://agro-v.com/de/flachsernte-in-der-eu-im-jahr-2020/>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Akg2013] Akgül, Mehmet: *Suitability of stinging nettle (Urtica dioica L.) stalks for medium density fiberboards production*. In: *Composites Part B: Engineering* 45 (2013), Nr. 1, S. 925–929

[Baustroh 2023] Baustroh: *BauStroh GmbH - Unsere Leistungen*. URL <https://baustroh.de/leistungen.html>. – Aktualisierungsdatum: 02.03.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Ber2023] Berendt, Ferréol ; Bajalan, Iman ; Wenig, Chareltt: *Estimation of Scots pine bark biomass delivered to the wood industry in Northern Germany*. In: *Central European Forestry Journal* 69 (2023)

[Ber2021] Berendt, Ferréol ; Miguel-Diez, Felipe de ; Wallor, Evelyn ; Blasko, Lubomir ; Cremer, Tobias: *Comparison of different approaches to estimate bark volume of industrial wood at disc and log scale*. In: *Scientific reports* 11 (2021), Nr. 1, S. 15630

[Ber2021] Berendt, Ferréol ; Pegel, Erik ; Blasko, Lubomir ; Cremer, Tobias: *Bark proportion of Scots pine industrial wood*. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 79 (2021), Nr. 3, S. 749-752

[BLE2021] BLE: *Nutzhanfanbau 2021: Anzahl der Betriebe und Fläche weiter gewachsen*. URL https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/211001_Nutzhanfanbau.html. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[BMEL 04.05.2023] *BMEL-Statistik: Tabellen zur Landwirtschaft*. URL <https://bmel-statistik.de/landwirtschaft/tabellen-zur-landwirtschaft/>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[BMEL 2020] *Entwicklung von industriellen Bereitstellungsketten von Brennesseljungpflanzen bis zur Nesselfaser (InBeNeFa)* (2020). URL <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22033211> – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[BMEL 2016] BMEL: *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, : Wald und Rohholzpotenziale der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052*. Berlin : Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2016

[BMEL 2018] BMEL: *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur (Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2018*

[BMEL 2021] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft Waldbericht der Bundesregierung 2021 (Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2021

[Bre1959] Bredemann, G.: *Die Große Brennessel Urtica dioica L.*, Berlin : Akademie-Verlag, 1959

[Brennessel Textil 2015] Brennessel Textil: *Kulturansprüche | Story of Nettle*. URL <https://www.brennessel-textil.de/2015/10/kulturansprueche/>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Bundesinformationszentrum Landwirtschaft] Bundesinformationszentrum Landwirtschaft: *Bundesinformationszentrum Landwirtschaft: Welches Potenzial hat Hanf als Nutzpflanze?* URL <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-arbeiten-foerster-und-pflanzenbauer/welches-potenzial-hat-hanf-als-nutzpflanze>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Bundesvereinigung Nachhaltigkeit e.V] Bundesvereinigung Nachhaltigkeit e.V.: *Implementierung-einer-Nutzhanfindustrie-in-der-Lausitz 2021*. URL <https://nachhaltigkeit.bvng.org/wp-content/uploads/2021/09/BVNG-Implementierung-einer-Nutzhanfindustrie-in-der-Lausitz-Machbarkeitsstudie-Berlin-2021.pdf> – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[BWI³] Thünen-Institut, Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank, <https://bwi.info>

[Carbon Smart Materials 2023] Carbon Smart Materials Palette: *CARBON IMPACT OF STRAW-BALE*. URL <https://materialpalette.org/straw-bale/>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[CBI2019] CBI: *Exporting linseeds to Europe | CBI*. URL <https://www.cbi.eu/market-information/grains-pulses-oilseeds/linseeds/europe>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[CM Staff 2016] Cm Staff: *Researchers develop super grass that can be used for low-carbon buildings*. In: *Construction Management* (2016-10-03)

[Rol2017] daniel Rolfsmeyer: *Merkblatt-Hanf* (2017). URL <https://www.oeko-komp.de/wp-content/uploads/2018/03/Merkblatt-Hanf.pdf> – Überprüfungsdatum 03.05.2023

[DMP Gruppe 2022] DMP Gruppe: *ISO-Stroh Einblasdämmung*. URL <https://www.dpm-gruppe.com/leistungen/daemmstoffe/>. – Aktualisierungsdatum: 26.01.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[EcoTechnilin] EcoTechnilin: *FLAXTAPE*. URL <https://eco-technilin.com/en/15-flaxtape>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Egginger Naturbaustoffe 2023] Egginger Naturbaustoffe: *Schilf*. URL <https://egginger-naturbaustoffe.de/daemmstoffe/schilf>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Energie-Experten 2022] Energie-experten: *Ökologische Strohdämmung im Überblick*. URL <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/daemmstoffe/strohdaemmung>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Energiepflanzen 2022] Energiepflanzen: *Miscanthus / Elefantengras / Miscanthus x giganteus*. URL https://www.energiepflanzen.com/miscanthus/#Kompaktinfos_zu_Miscanthus_Elefantengras. – Aktualisierungsdatum: 24.08.2022 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Erzgebirge Flachs] Erzgebirgische Flachs GmbH: Flachswerg. URL <http://flachsfaser.de/html/flachswerg.html>. – Aktualisierungsdatum: 23.11.2010 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Eng2020]Engel, Jan ; Knoche, Dirk: *Die Robinie: Eine »kurzumtriebige« Baumart mit vielfältigen Nutzungsoptionen – LWF Wissen 84*. URL <https://www.lwf.bayern.de/waldbau-bergwald/waldbau/265972/index.php>. – Aktualisierungsdatum: 2023-05-04 – Überprüfungsdatum 2023-05-04

[FNR 2019] FNR: FNR - Baustoffe: *Schilfrohr*. URL <https://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/materialien/schilfrohr>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[FNR2022] FNR: *Mediathek - Anbaufläche Nachwachsender Rohstoffe in Deutschland nach Kulturarten 2020-2022*. URL <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/landwirtschaft/anbauflaechenachwachsender-rohstoffe-in-deutschland-nach-kulturarten-2020-2022.html>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[FNR2020] FNR: *Mediathek - Flächennutzung in Deutschland*. URL <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/landwirtschaft/flaechennutzung-in-deutschland.html>. – Aktualisierungsdatum: 03.05.2023 – Überprüfungsdatum 03.05.2023

[FNR] FNR: *Paludikulturen mit Schilf und Rohrkolben in die Praxis bringen*. URL <https://pflanzen.fnr.de/service/presse/archiv/archiv-nachricht/paludikulturen-mit-schilf-und-rohrkolben-in-die-praxis-bringen-1>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Fra2019] Frank, Susanne: *Miscanthus: Ein Schilf für zerstörte Böden*. URL <https://edison.media/erklaren/miscanthus-ein-schilf-fuer-zerstoerte-boeden/23750416.html>. – Aktualisierungsdatum: 24.10.2019 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Fraunhofer-IBP 2023] Fraunhofer-IBP: *Neuer tragfähiger und dämmender Baustoff aus Rohrkolben (Typha)*. URL <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/baustoff-aus-rohrkolben.html>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Fraunhofer-IBP 2023] Fraunhofer-IBP: *Nutzen für Bau und Umwelt : Baustoff aus Typha punktet durch vielfältige Qualitäten*. URL https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/pi_2014-01_typha.html. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Fre] Freudenberger: *Produktdatenblatt Faserlein*. URL <https://www.freudenberger.net/downloadlink-6335>

[Greifswald Moor Centrum 2016a] Greifswald Moor Centrum: *Rohrkolben (Typha spp.) : Landwirtschaft in nassen Mooren (2016a)*. URL https://mowi.botanik.uni-greifswald.de/files/doc/paludikultur/imdetail/steckbriefe_pflanzenarten/Flyer%20Rohrkolben.pdf – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Greifswald Moor Centrum 2019] Greifswald Moor Centrum: *Rohrwerbung ist aussterbendes UNESCO-Kulturerbe – Potentiale für regionale Wertschöpfung und Umweltschutz kaum genutzt : Faktenpapier zu Rohrwerbung in Mecklenburg-Vorpommern, 10/2019 (2019), Nr. 10*. URL

https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/Faktenpapier%20Rohrwerbung.pdf –
Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Greifswald Moor Centrum 2016b Greifswald Moor Centrum: *Schilf (Phragmites australis) : Landwirtschaft auf nassen Mooren* (2016b). URL https://mowi.botanik.uni-greifswald.de/files/doc/paludikultur/imdetail/steckbriefe_pflanzenarten/Flyer%20Schilf.pdf –
Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Gau2014] Greta Gaudig ; Claudia Oehmke ; Susanne Abel ; Christian Schröder: Moornutzung neu gedacht: Paludikultur bringt zahlreiche Vorteile : Re-thinking mires: *Advantages of paludiculture*. In: *Anliegen Natur* 36 (2014), Nr. 2, S. 67–74. URL https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an36204gaudig_et_al_2014_paludikultur.pdf –
Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Gus2016] Gusovius, Hans-Jörg ; Hoffmann, Thomas ; Budde, Jörn ; Lühr, Carsten: *Immer noch speziell? – Verfahren zur Ernte von Faserhanf*. 14–24 Seiten / *LANDTECHNIK*, Bd. 71 Nr. 1 (2016)

[Grü2007] Holger Gruenewald, Barbara K.V. Brandt, B. Uwe Schneider, Oliver Bens, Gerald Kendzia, Reinhard F. Hüttl: Agroforestry systems for the production of woody biomass for energy transformation purposes, In: *Ecological Engineering*, Elsevier (2007)

[Her2017] Herder, Michael den ; Moreno, Gerardo ; Mosquera-Losada, Rosa M. ; Palma, João H.N. ; Sidiropoulou, Anna ; Santiago Freijanes, Jose J. ; Crous-Duran, Josep ; Paulo, Joana A. ; Tomé, Margarida ; Pantera, Anastasia ; Papanastasis, Vasilios P. ; Mantzanas, Kostas ; Pachana, Przemko ; Papadopoulos, Andreas ; Plieninger, Tobias ; Burgess, Paul J.: Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 241 (2017), S. 121–132

[Hij2005] Hijmans, Robert J. ; Cameron, Susan E. ; Parra, Juan L. ; Jones, Peter G. ; Jarvis, Andy: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. In: *International Journal of Climatology* 25 (2005), Nr. 15, S. 1965–197

[His2023] Hiss Reet: Baustoffe aus Schilf. URL <https://www.hiss-reet.de/baustoffe-aus-schilf.> –
Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Hochschule für Nachhaltige Entwicklung 2022] Hochschule für Nachhaltige Entwicklung: Satzung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis sowie zur Vermeidung wissenschaftlichen Fehlverhaltens und für den Umgang mit Verstößen an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE, 2022 [IMH2018] IMHOFF, Britta: Strohballenbau: Statik, Baukonstruktion, Energieberatung. URL <https://ingenieurbuero-imhoff.de/projekte-strohballenbau.htm>. – Aktualisierungsdatum: 25.05.2018 –
Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Innovatives Brandenburg 2022] Innovatives Brandenburg: Hanf Wertschöpfungsketten für Brandenburg. URL <https://innovatives-brandenburg.de/de/news/hanf-wertschoepfungsketten-fuer-brandenburg.> –
Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Jäk2018] Jäkel, Kirsten: Anbau von Miscanthus - Landwirtschaft. URL <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/anbau-von-miscanthus-4040.html>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Kae2019] Kaesberg, Benedikt: *SBR_2019* (2019). URL https://baustroh.de/pdf/SBR_2019.pdf –
Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Kät2012] Kätzel, Ralf: Flaum- und Zerr-Eiche in Brandenburg – Alternative Baumarten im Klimawandel? In: *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 49 (2012)

[Küh2022] Kühmaier, Martin ; Kral, Iris ; Kanzian, Christian: Greenhouse Gas Emissions of the Forest Supply Chain in Austria in the Year 2018. In: Sustainability 14 (2022), Nr. 2, S. 792

[LAM1995]Lamnek, Siegfried: *Methoden und Techniken*, 20XX (Qualitative Sozialforschung Band 2)

[Land der Ideen 2023] Land der Ideen: *Building material from bulrush*. URL <https://land-der-ideen.de/en/project/building-material-from-bulrush-541>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Lit2023]Litschel, Johannes ; Berendt, Ferréol ; Wagner, Hanna ; Heidenreich, Simon ; Bauer, David ; Welp, Martin ; Cremer, Tobias: Key Actors' Perspectives on Agroforestry's Potential in North Eastern Germany. In: Land 12 (2023), Nr. 2, S. 458

[Man2018] Mantau, Udo: ROHSTOFFMONITORING HOLZ Daten und Botschaften. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2018)

[May2002] Mayring, Philipp: Einführung in die qualitative Sozialforschung. 5. Auflage. Weinheim : Beltz, 2002 (Beltz Studium)

[May2007] Mayring, Philipp: Qualitative Inhaltsanalyse : Grundlagen und Techniken. 9. Aufl., Dr. nach Typoskr. Weinheim, Basel : Beltz, 2007 (UTB für Wissenschaft Pädagogik 8229)

[Mey2015] Meyer-Münzer, B. ; Grotehusmann, H. ; Vor, T.: Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.) In Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten – Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. In: Göttinger Forstwissenschaften (2015), Nr. 7, S. 277–296

[MIL2011] MIL: Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Waldvision 2030 – Eine neue Sicht für den Wald der Bürgerinnen und Bürger. Potsdam : Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MIL), 2011

[Mir2020] Mirizzi Francesco ; Wilsom Catherine: Hanf ein wirklicher grüner Deal (2020). URL https://eiha.org/wp-content/uploads/2020/09/Hanf-ein-wirklicher-gru%CC%88ner-Deal_DE.pdf – Überprüfungsdatum 03.05.2023

[MLU2016] MLU: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, Merkblatt zur Bewirtschaftung von Kiefernbeständen. Magdeburg : Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU), 2016

[MLUK2020]MLUK: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz, Hinweise zur Bewirtschaftung von Robinien-Beständen in Brandenburg. Potsdam : Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK), 2020

[MLUK2021] MLUK: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg und Landesbetrieb Forst Brandenburg, Zustand und Entwicklung der Rot-Buche in den Wäldern Brandenburgs unter den Bedingungen des Klimawandels,. In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe (2021), Nr. 71

[MLUK2021] MLUK: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz, BERICHT ZUR LAGE UND ENTWICKLUNG DER FORSTWIRTSCHAFT IN BRANDENBURG 2019 – 2021. Potsdam : Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK), 2021

[MLUL 2015] MLUL: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft, Wälder Brandenburgs – Ergebnisse der ersten landesweiten Waldinventur. Potsdam : Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft (MLUL), 2015

[Nic2001] R. Nickel; C. Liedtke; P. Heuer, Forschungslandschaft Biotische Rohstoffe in Wuppertal Papers Nr. 114 (2001: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

[Obe2019] Oberhuber, Lena: Schilf und Stroh | Energieinstitut Vorarlberg. In: Energieinstitut Vorarlberg (2019-09-13)

[Oeb2014] Oebbeke, Alfons: Natur-Dämmstoff aus Typha (Rohrkolben) druckstabil und schimmelresistent. URL <https://www.baulinks.de/webplugin/2014/0187.php4>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[OEKOBAU.Dat 2018] OEKOBAU.DAT. URL <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=af13e5a8-0961-454a-ad3a-7093a37fc802&version=20.19.120>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Qui2012] Quinkenstein, Ansgar; Freese, Dirk; Böhm, Christian; Tsonkova, Penka; Hüttl, Reinhard F.: Agroforestry for Mine-Land Reclamation in Germany: Capitalizing on Carbon Sequestration and Bioenergy Production, In: Agroforestry - The Future of Global Land Use (2012) pp 313–339

[Röh1998] Röhrich, Christian ; Schulz, Jürgen ; Rexroth, Eckhard ; Neubert, Monika ; Groß-Ophoff, Angelika ; Brix, Barbara: Flachs in Sachsen - wirtschaftlich und umweltgerecht. In: Schrifreihe der sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (1998), Nr. 8

[Saa2019] Saad, M. ; Sabathier, V. ; Turatsinze, A. ; Magniont, C.: Potential of oleaginous flax fibre as mortar reinforcement. 263-269 Pages / Academic Journal of Civil Engineering, Vol 37 No 2 (2019): Special Issue - ICBBM 2019 (2019)

[Sch2002] Schulz, Jürgern: Wirtschaftlichkeit (2002). URL <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13600/documents/15554>

[Statistik Berlin Brandenburg] Statistisk Berlin Brandenburg: Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland in Brandenburg (Endgültiges Ergebnis). URL <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/c-ii-2-j>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Statistik Berlin Brandenburg] Statistisk Berlin Brandenburg: Getreide und Winterraps in Brandenburg, Ernte 2021 unterdurchschnittlich. URL <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/211-2021>. – Aktualisierungsdatum: 04.05.2023 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[STO2009] STONE, R. K.: *Robinia pseudoacacia*. *Fire Effects Information System*. URL www.fs.fed.us/database/feis/plants/tree/robpse/all.html – Überprüfungsdatum 2020-04-16

[Sut2011] Sutton, Andy ; Black, Daniel: Hemp Lime : An introduction to low impact building material. In: BRE (2011), 14/11. URL https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low_impact_materials/IP14_11.pdf – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Tav2020] Tavakoli-Hashjini, Ehsan ; Piorr, Annette ; Müller, Klaus ; Vicente-Vicente, José Luis: Potential Bioenergy Production from *Miscanthus x giganteus* in Brandenburg: Producing Bioenergy and Fostering Other Ecosystem Services while Ensuring Food Self-Sufficiency in the Berlin-Brandenburg Region. In: Sustainability 12 (2020), Nr. 18, S. 7731

[Dom2023] Ulrike Domann: Empfehlungen zum Hanfanbau in Südbrandenburg (o.J.). URL <http://www.ulrike-domann.de/index-dateien/hanf.pdf> – Überprüfungsdatum 03.05.2023

[VanBoc2013] van Boclaer, Anja: Fester als Hanf - glänzend wie Seide. In: nd - Journalismus von links (2013-10-08)

[Via2021] Vianen, Faay: Flax wall core - MaterialDistrict. URL <https://materialdistrict.com/material/flax-wall-core/>. – Aktualisierungsdatum: 14.04.2021 – Überprüfungsdatum 04.05.2023

[Wen2023] Wenig, Charlett ; Reppe, Friedrich ; Horbelt, Nils ; Spener, Jaromir ; Berendt, Ferréol ; Cremer, Tobias ; Frey, Marion ; Burgert, Ingo ; Eder, Michaela: Adhesives free bark panels: An alternative application for a waste material. In: PloS one 18 (2023), Nr. 1, e0280721

[Wic2015] Wichmann, Sabine ; Köbbing, Jan Felix: Common reed for thatching—A first review of the European market. In: Industrial Crops and Products 77 (2015), S. 1063–1073

[Wil2021] Wilms, Florian ; Duppel, Nils ; Cremer, Tobias ; Berendt, Ferréol: Bark Thickness and Heights of the Bark Transition Area of Scots Pine. In: Forests 12 (2021), Nr. 10, S. 1386

[Wit1985] A. Witzel, Das problemzentrierte Interview. In Qualitative Forschung in der Psychologie: Grundfragen, Verfahrensweisen, Anwendungsfelder (Beltz: Weinheim, Ed. G. Jüttemann, 1985) pp 227–255, ISBN 3407546807.

[Yan2014] Yan, Libo ; Chouw, Nawawi ; Jayaraman, Krishnan: Flax fibre and its composites – A review. In: Composites Part B: Engineering 56 (2014), S. 296–317

3.2 Potentialanalyse regional verfügbarer Sekundärrohstoffe und Chancen, Strukturen und Narrative der Kreislaufwirtschaft in Berlin und Brandenburg (AP 2)

[Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2022] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: Auszüge Erhebung über die Abfallentsorgung im Jahr 2020, Berlin und Brandenburg. 29.03.2022

[Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2022] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: Auszüge Erhebung über die Aufbereitung und Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen 2020. 21.03.2022

[Bas2021] Basten, Michael: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 : Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Berlin, Januar 2021

[Bra2021] Braun, Nadine ; Hopfensack, Lucie ; Fecke, Marina ; Wilts, Henning: gebäude Chancen und Risiken im Gebäudesektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft : Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI). Mai 2021

[Bre2021] Breitenbücher, Rolf: Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). 29. Oktober 2021 (1)

[Buc2022] Buchert, Matthias ; Bleher, Daniel ; Bulach, Winfried ; Knappe, Florian ; Muchow, Nadine ; Reinhardt, Joachim ; Meinshausen, Ingo: Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III) : 47/2022. Dessau-Roßlau, April 2022

[Cha2022] Charlotte, L. ; Eberhardt, M. ; Birgisdottir, H.: Building the future using the existing building stock: the environmental potential of reuse. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1078 (2022), Nr. 1, S. 12020

[Circular Ecology 2019] Circular Ecology: Embodied Carbon - The ICE Database : Inventory of Carbon and Energy. URL <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> –

Überprüfungsdatum 09.01.2023

[Eurostat2010] Commission of the European Communities, Eurostat: Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories : Supplement to the Manual for the Implementation of the Regulation (EC) No 2150/2002 on Waste Statistics. Version 2. December 2010

[Fig2019] Figl, Hildegund: ÖKOBAUDAT : Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. 2., überarbeitete Auflage, September 2019. Bonn : Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2019 (Zukunft Bauen Band 09)

[Fra2010] Francis, Jill J. ; Johnston, Marie ; Robertson, Clare ; Glidewell, Liz ; Entwistle, Vikki ; Eccles, Martin P. ; Grimshaw, Jeremy M.: What is an adequate sample size? Operationalising data saturation for theory-based interview studies. In: Psychology & Health 25 (2010), Nr. 10, S. 1229–1245

[Fre2023] Frederichs, Matthias: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 : Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Berlin, Januar 2023

[Hil2018] Hillebrandt, Annette ; Riegler-Floors, Petra ; Rosen, Anja ; Seggewies, Johanna-Katharina: Atlas Recycling : Gebäude als Materialressource. Erste Auflage. München : Detail Business Information GmbH, 2018 (Edition Detail)

[Hor2020] Hornberg, Claudia ; Niekisch, Manfred ; Calliess, Christian ; Kempf, Claudia ; Lucht, Wolfgang ; Messari-Becker, Lamia ; Rotter, Vera Susanne: Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa : Umweltgutachten 2020. Berlin, Januar 2020

[Kir2018] Kirchherr, Julian ; Piscicelli, Laura ; Bour, Ruben ; Kostense-Smit, Erica ; Muller, Jennifer ; Huibrechtse-Truijens, Anne ; Hekkert, Marko: Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). In: Ecological Economics 150 (2018), Nr. 4, S. 264–272

[Küp2022] Küpfer, C. ; Bastien-Masse, M. ; Devènes, J. ; Fivet, C.: Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1078 (2022), Nr. 1, S. 12013

[May2019] Mayring, Philipp ; Fenzl, Thomas: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung : Qualitative Inhaltsanalyse. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer VS, 2019

[Ros2019] Rose, Ansgar ; Sack, Norbert ; Nothacker, Klemens ; Gassmann, Andrea: Recycling von Flachglas im Bauwesen - Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen. Stuttgart, 2019 (ift-Forschungsbericht)

[Rot2023] Rotter, Vera Susanne: Rohstoffe für die Energiewende : Aktuelle und zukünftige Herausforderungen. In: Müll und Abfall 02 (2023), S. 108–115. URL <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2023.02.08>

[Sch2015] Schiller, Georg ; Ortlepp, Regine ; Krauß, Norbert ; Steger, Sören ; Schütz, Helmut ; Acosta Fernández, José ; Reichenbach, Jan ; Wagner, Jörg ; Baumann, Janett: Kartierung des Anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft : 83/2015. Dessau-Roßlau, Juli 2015

[SenUMVK2022] Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz: Monitoring-Bericht zur Umsetzung des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms (BEK 2030) : Berichtsjahr 2021. Februar 2022

[StatistischesBundesamt2022] Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen - 2020. 30.06.2022

[Ste2019] Steger, Sören ; Ritthoff, Michael ; Bulach, Winfried ; Schüler, Doris ; Kosinska, Izabela ; Degreif, Stefanie ; Dehoust, Günter ; Bergmann, Thomas ; Krause, Peter ; Oetjen-Dehne, Rüdiger: Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität : 34/2019. Dessau-Roßlau, April 2019

[VOG2021]VOGT, Regine ; HARJU, Noora ; GONSER, Jürgen: *Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2020 für das Land Berlin*. Berlin, Dezember 2021

3.3 CO₂-Lebenszyklus (AP 3)

[Ard2022] Arduin, D., L. R. Caldas, R. D. M. Paiva, and F. Rocha. 2022. Life Cycle Assessment (LCA) in Earth Construction: A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. *Sustainability* **14**.

[Cab2020] Cabrera, S. P., Y. G. Aranda-Jiménez, E. J. Suárez-Domínguez, and R. Rotondaro. 2020. Compressed earth blocks (CEB) stabilized with lime and cement. Evaluation of both their environmental impact and compressive strength. *Habitat Sustentable* **10**:71-81.

[Chr2016] Christoforou, E., A. Kylili, P. A. Fokaides, and I. Ioannou. 2016. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production* **112**:443-452.

[Chu2020] Churkina, G., A. Organschi, C. P. O. Reyer, A. Ruff, K. Vinke, Z. Liu, B. K. Reck, T. E. Graedel, and H. J. Schellnhuber. 2020. Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* **3**:269-276.

[Mar2018] Martin, A. R., M. Doraisami, and S. C. Thomas. 2018. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nature Geoscience* **11**:915-920.

[Pom2018] Pomponi, F., and A. Moncaster. 2018. Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **81**:2431-2442.

3.3 Life Cycle Design/ Lebenszyklusdesign (AP 4)

[Hen13] HENSEL: Archäologische Baubegleitung von Sondierungen Potsdam, Dortustraße, Ecke Spornstraße, Archäologie Manufaktur GmbH, Wustermark, 2023

[WJ13] WEIMAR, H., JOCHEM, D. (eds): *Holzverwendung im Bauwesen - Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 9, 2013, S. 7

[IH17] INFORMATIONSDIENST HOLZ e.V.: *spezial - Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern*, Informationsverein Holz e.V., 2017, S. 39

[HD22] Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V.: *Lagebericht 2022 Zimmerer/Holzbau*, Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V., 2022, S. 3

[SB23] Statistisches Bundesamt: *Handwerkszählung(EVAS-Nr. 53111) in den Jahren 2008-2019 und 2020*, zitiert nach destatis.de, [online] <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=statistic&levelindex=0&levelid=1683896832641&code=53111#abreadcrumb>, abgerufen: 02.02.2023

[SHR08] SCHEER, D., HOFFMANN, E., RUBIK, F.: *Mit Holz in die Zukunft? Eine Branche am Scheideweg*, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, 2008, S. 21

[SH21] HILLEBRANDT, A., SEGGEWIES, J.: *Recyclingpotenziale von Baustoffen*. In Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A., Seggewies: *Atlas Recycling*, Edition Detail, 2021, S 60ff

[TCC17] TINGLEY, D., COOPER, S., CULLEN, J., SEGGEWIES, J.: *Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective*. White Rose, University of Leeds, Sheffield & York, Sheffield, 2017, S 2

[Beu21] BEURSKENS, P.: *The development of an evaluation method to support circular building design*. University of Twente, Enschede, 2021, S 28

[Ros21] ROSEN, A.: *Urban Mining Index*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2021

[God20] GODDIN, J., et al.: *Circularity Indicators – An Approach to Measuring Circularity*, Ellen MacArthur Foundation, 2020

3.5 Assoziierte Masterarbeit: Potentialanalyse Lehm

[Bcma00] BC Materials: *Steckbrief - Gepresste Lehmsteine, Brüssel*. Zugegriffen 2. Januar 2023. <https://www.bcmaterials.org/assets/techfiche-brickette-fr.pdf>.

[Bund21a] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.: *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018* (Nr. 12). Berlin : Kreislaufwirtschaft Bau, 2021

[Bund21b] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Deutschland – Rohstoffsituation 2020*. Hannover, 2021

[Cycl00] Cycle Terre: *Steckbrief - Gepresste Lehmsteine, Sevrans*. Zugegriffen 2. Januar 2023. https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/04/FT_BTC_201108.pdf.

[DeKS82] Dethier, Jean ; Klotz, Heinrich ; Striedter, Karl Heinz: *Lehmarchitektur: Die Zukunft einer vergessenen Bautradition*. München : Prestel-verlag, 1982 — ISBN 978-3-7913-0586-8

[Diff00] Different equipment for different needs. Zugegriffen 2. Januar 2023. <https://aureka.com/all-equipment/>.

DIN 18945:2018-12, Lehmsteine_- Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung : Beuth Verlag GmbH

DIN 18946:2018-12, Lehmmauermörtel_- Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung : Beuth Verlag GmbH

DIN EN ISO 14688-1:2020-11 Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 1: Benennung und Beschreibung. Beuth Verlag GmbH

[Elsn22] Elsner, Harald: *Sand und Kies in Deutschland Band II: Gewinnung in den Bundesländern* : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2022

[IcLa22] Icha, Petra ; Lauf, Thomas: *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2022

[JäHa19] Jäger, Wolfram ; Hartmann, Raik: Lehm-mauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland, Forschungsinitiative ZukunftBau. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2019 — ISBN 978-3-7388-0441-6

[Mink09] Minke, Gernot: Handbuch Lehm-bau: Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur. Stauf en bei Freiburg : Ökobuch, 2009 — ISBN 978-3-936896-41-1

Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, BMW SB – Lehmstein.
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=606d978a-c44a-4b3e-8387-b1291b12e522&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de. Aufruf: 31.März 2023.

Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, BMW SB – Mauerziegel.
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f98eea66-671c-4014-bfbb-2db1ffb8331&version=00.05.000&stock=OBD_2021_II&lang=de. Aufruf: 31.März 2023.

Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, BMW SB – Beton-Mauerstein.
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bdda4364-451f-4df2-a68b-5912469ee4c9&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de. Aufruf: 31.März 2023.

Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen, BMW SB – Stampflehmwand.
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=59622fc0-d719-43bf-a16b-ae924ae0d276&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de. Aufruf: 31. März 2023.

[RöZi14] Röhlen, Ulrich ; Ziegert, Christof: Lehm-bau-Praxis: Planung und Ausführung, Praxis. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Wien Zürich : Beuth, 2014 — ISBN 978-3-410-29123-7

[ScLe20] Schroeder, Horst ; Lemke, Manfred: Ökologische Bilanzierungen für Lehm-baustoffe. In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk Kalender 2020. 1. Aufl. : Wiley, 2020 — ISBN 978-3-433-03252-7, S. 39–62

[TMPG20] Teixeira, Elisabete R. ; Machado, Gilberto ; P Junior, Adilson de ; Guarnier, Christiane ; Fernandes, Jorge ; Silva, Sandra M. ; Mateus, Ricardo: Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks. In: Energies (Basel) Bd. 13. Basel, MDPI AG (2020), Nr. 11, S. 2978-

[VoLu19] Vogt, Regine ; Ludmann, Sabrina: Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2018 für das Land Berlin : Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SenUVK), Referat Kreislaufwirtschaft, 2019

[VoRö09] Volhard, Franz ; Röhlen, Ulrich: Lehm-bau Regeln: Begriffe - Baustoffe - Bauteile, Praxis. 3., überarbeitete Auflage, Stand: Februar 2008. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009 — ISBN 978-3-8348-0189-0

[Ward16] Wardak, Alias: Lebenszyklusanalyse von Gebäuden: Ganzheitliche Bilanzierung (GABI) von Außenwänden aus Lehm im Vergleich zu anderen Baustoffen. Saarbrücken : Akademiker Verlag, 2016 — ISBN 978-3-639-85477-0

Anhangverzeichnis

Kapitel	Nr.	Titel
		Geographische Eingrenzung des Projekts Proto Potsdam in der
2	A_1	Ressourcenregion Berlin-Brandenburg
3.2	A_2	Interviewleitfaden Experteninterviews
3.2	A_3	Interviewauswertung_Codelist
3.2	A_4	Interviewauswertung_CodierteSegmente
3.2	A_5	Interviewauswertung_SemiquantitativeAnalyse
3.2	A_6	Abfallaufkommen Altholz
3.2	A_7	Abfallaufkommen Beton und Bauschutt
3.2	A_8	Abfallaufkommen Flachglas
3.2	A_9	Vergleich der Abfallstatistiken
3.2	A_10	Liste der Entsorgungsfachbetriebe in Berlin und Brandenburg
3.2	A_11	Karte Altholz
3.2	A_12	Karte Beton
3.2	A_13	Karte Flachglas
3.2	A_14	Übersicht_CO2_C_EoL_Gebäude- und Infrastrukturbestand in Berlin 2020_neu
3.2	A_15	BAUFACHFRAU Berlin_Innenraumtrennwände mit Regalfunktion
3.2	A_16	Kunst-Stoffe_Statische Fenstermodule/ Glaswände
3.2	A_17	Material Mafia_AI- PE Boxen, Wandpaneele
3.2	A_18	Mitkunstzentrale_Künstlerische Geopolymer Beton Elemente
3.2	A_19	Mitkunstzentrale_Künstlerische Mycel-Altholz Verbundstoffe
3.2	A_20	Etiketten_Prototypen
3.4	A_21	Entwurfszeichnungen_Unterlagen Bauantrag
3.4	A_22	Archäologischer Fundbericht
3.5	A_23	Tabelle 05- Zusammenf. der Prüfungserg. nach DIN 18945_Gaeth und Kretschmann 2023
3.6	A_24	Matrix Bautraegerkonstellationen
3.6	A_25	Uebersicht Vergabeverfahren
3.6	A_26	Szenario Verfahren
3.6	A_27	Nachhaltigkeit auf allen Ebenen_Impuls Rietz
3.6	A_28	BE EZB Factsheet
3.6	A_29	EZB_Flaechenkalkulation
3.6	A_30	ANL1-LOI_220608 BE und Vorhaben EZB
3.6	A_31	ANL2-LOI_220608_EBRV-Eckdaten
3.6	A_32	ANL2-LOI_220608_EBRV-Textgeruest
3.6	A_33	ANL2-LOI_220608_Skizze Grundstückszuschnitt
3.6	A_34	Auszug Beschlussprotokoll Stiftungsrat
3.6	A_35	Auszug Beschlussprotokoll Nov 2022 Stiftungsrat
3.6	A_36	Anrainertreffen_TN Steckbriefe
3.6	A_38	Entwürfe Entwurfseminar TU Berlin
3.7	A_37	Auflistung Presse

