

Auswertung und Darlegung der aus Stufe II. ermittelten Forschungsziele des Kooperationspartners Hochschule Bochum

EcoSights

NACHHALTIGES MUSEUM DETMOLD

Entwicklung von architektonischen und bauklimatischen Maßnahmen
zum Bau und Betrieb Nachhaltiger Museen
am Beispiel des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes
des LWL-Freilichtmuseums Detmold,
Westfälisches Landesmuseum für Alltagskultur

**Abschlussbericht der 2. Stufe: Recyclingkonzept und Analyse der
Regionalität und des ökologischen Transportaufwands der verwendeten
Baustoffe im Gebäude**

Arbeitspaket 5.1 und 5.2

Kooperationspartner

Hochschule Bochum

Prof. Dipl.-Ing. Volker Huckemann (Lebenszyklusanalyse, Baustoffe, Rezyklierbarkeit)

Fachbereich Architektur

Lennershofstr. 140, 44801 Bochum

+49 (0)171-6142446 | volker.huckemann@hs-bochum.de

Mitarbeiter:

Jannis Maurer M.sc

Kyrilo Sobolyev M.Sc.

Klara Bunzel cand.arch.

Inhaltsverzeichnis

1.1	Einleitung	4
1.1.1	Thema und Relevanz	4
1.1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung Stufe II HS Bochum.....	5
1.1.3	Methodisches Vorgehen.....	6
1.1.4	Abgrenzung des Themas	7
1.1.5	Theoretische Grundlagen zum Forschungsschwerpunkt der Stufe II.....	8
1.1.6	Definition Regionalität	12
1.1.7	Ökologischer Transportaufwand von Baustoffen	14
1.2	Arbeitspaket 5.1: Fortführung der Ökobilanz; Analyse der Gesamtkobilanz des Neubaus FLM Detmold	15
1.2.1	Fortführung der Rechenmodelle / Ist-Zustand Gebäude.....	15
1.2.2	Bedeutung der Regionalität, Vergleichende Betrachtung der Transportwege (Modul A4 in den EPDs)	29
1.2.3	Fazit Ökobilanz	35
1.3	Arbeitspaket 5.2: Ökobeton.....	37
1.3.1	CO2 reduzierte Betone /Möglichkeiten zur Herstellung	37
1.3.2	Entwicklung eines Ökobetons für das Projekt FLM.....	45
1.3.3	Bewertung -.....	48
1.3.4	Ökonomie des Ökobetones	49
1.3.5	Handlungsempfehlungen für zukünftige Projekte	53
1.3.6	Entwicklung von Nachnutzungsszenarien für Bauteile aus Ökobeton.....	57
1.4	Literaturverzeichnis Part HS BO	63

1.1 Einleitung

Der Abschlussbericht der Stufe I des Forschungsprojektes widmet sich der umfassenden Recherche nach umweltfreundlichen und nachhaltigen Materialien für den baukonstruktiven Einsatz im Neubau des Museums in Detmold. In dem Bericht wurden verschiedene Bauteilvarianten in den Hauptbereichen erdberührte Bauteile, Decken und Dach, Außenwände, Innenwand (tragend) und Innenwand (nichttragend) verglichen. Für jede Bauteilkategorie wurden fünf verschiedene Kriterien eingehend geprüft: Funktionalität, deren Ökobilanz und Kreislaufwirtschaft, regionale Verfügbarkeit sowie Aspekte der Bauklimatik. Die im ersten Abschlussbericht vorgeschlagenen Baustoffe wurden größtenteils übernommen, was für den Einfluss und den Erfolg der ersten Phase der Forschungsergebnisse auf die Planung und Ausführung des Gebäudes spricht.

In der hier dargestellten zweiten Stufe des Förderprojektes konzentriert sich die Auswertung auf die Ökobilanz der wesentlichen Bauteile im Gebäude, mit besonderem Fokus auf den Transport von Baustoffen von der Fertigung bis zur Baustelle und deren Regionalität. Die Betrachtung innerhalb der Ökobilanzierung fokussiert sich dabei auf die Module der Lebenszyklusanalyse A1-3, A4, und D (siehe Kapitel 1.1.5). Zusätzlich werden die Transportbedingungen der im Vorfeld festgelegten wesentlichen Baustoffe Beton, Holz und Lehm analysiert.

Beispielhaft wird das im Bauvorhaben verwendete Holz mit real ermittelten Transportdaten betrachtet, d.h. abseits der Mittelwerte, die in EPD's dargestellt werden, und hinsichtlich seiner CO₂-Neutralität beurteilt.

Das Gebäude befindet sich derzeit im Bau, was bedeutet, dass alle Baustoffe und Produkte innerhalb der Planung sowie Ausführung bereits ausgewählt und festgelegt sind. Allerdings sind der Ausbau und die Lieferungen der Baustoffe noch nicht abgeschlossen, so dass nur der Baustoff Holz im Bereich des Tragwerks (Fachwerkträger, Massivholzdecken, Stützen etc.) stichprobenartig untersucht werden. Die Erkenntnisse des Forschungsprojektes tragen in jedem Fall dazu bei, die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit des Bauprojektes sicherzustellen und zu optimieren.

1.1.1 Thema und Relevanz

Das Freilichtmuseum Detmold spiegelt eine Epoche wider, in der die Baustoffe von Gebäuden nahezu ausschließlich aus regionalem Ursprung stammten. Die dorftartig angeordneten Gebäude des LWL-Freilichtmuseums Detmold stammen aus verschiedenen Epochen und Regionen Westfalens. Das Museum, das 1971 eröffnet wurde, umfasst rund 120 historische Gebäude, die auf einer Fläche von etwa 90 Hektar verteilt sind. Diese Gebäude repräsentieren verschiedene historische Zeiträume, wobei die ältesten Strukturen bis ins 16. Jahrhundert zurückreichen. Einige Gebäude, wie die aus dem frühen 16. Jahrhundert stammenden Häuser, stehen neben Bauten des 19. Jahrhunderts, was eine breite zeitliche Abdeckung und eine Darstellung der Entwicklung des ländlichen Bauens ermöglicht. [1]

Die überwiegend aus dem 18. und 19. Jahrhundert stammenden Fachwerkbauten wurden zu einer Zeit errichtet, in der die Gewinnung und der Transport von Ressourcen noch nicht globalisiert waren. In dieser Zeit standen keine Verbrennungsmotoren zur Verfügung, die bei der Energieumwandlung von fossilen Brennstoffen CO₂-Emissionen verursachten. Die Transportwege der Rohstoffe zu den Herstellern und von dort aus zu den Baustellen waren daher in der Regel kurz. Als ein Beispiel für längere Transportwege könnten die Flößer genannt werden, die Holz auf dem Rhein aus dem Schwarzwald bis in die Niederlande transportierten.

Die damit einhergehende Regionalität der Baustoffe lässt sich eng mit dem Begriff der Nachhaltigkeit verknüpfen. Historisch bedingt wurde auf lokale Ressourcen zurückgegriffen, was nicht nur die Transportwege verkürzte, sondern auch die lokale Wirtschaft stärkte und eine nachhaltige Nutzung der verfügbaren Materialien förderte. Diese Praxis der Verwendung regionaler Baustoffe trug zur Dauerhaftigkeit der Gebäude bei und konnte gleichzeitig einen gewissen Komfort bieten, der auf die lokalen klimatischen und kulturellen Bedingungen abgestimmt war.

Der Neubau des Eingangs- und Veranstaltungsgebäudes des Freilichtmuseums Detmold soll diese historische Nachhaltigkeit weiterführen und die Prinzipien der ausgestellten Gebäude in die Gegenwart transferieren. Dieses Projekt zielt darauf ab, ein Leuchtturmprojekt für nachhaltiges Bauen in der Gegenwart und Zukunft zu sein. Es soll baukonstruktiv und gestalterisch eine Brücke zwischen den historischen Gebäuden im weitläufigen Museumsareal und zeitgenössischer Architektur und Bauweise schlagen. Durch die Integration traditioneller Nachhaltigkeitsprinzipien in moderne Bauprozesse kann das Projekt als Vorbild für zukünftige Bauvorhaben dienen und die Verbindung von Vergangenheit und Gegenwart im Bereich des nachhaltigen Bauens verdeutlichen.

1.1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung Stufe II HS Bochum

Als einer von mehreren Kooperationspartnern im Forschungsprojekt Ecosights, war die Hochschule Bochum zuständig für die ökologische Materialwahl und in dieser Funktion beratend für das Architekturbüro ACMS tätig. Neben den fast schon selbstverständlichen Baustoffen wie Holz und Lehm, die sich nicht nur aufgrund der aktuellen Debatte, sondern vor allem auch aus der Materialität der historischen Bauten des Museums anboten, ergaben sich auch andere Themen wie der Einsatz von Stroh als Dämmstoff oder die Nachnutzung von historischen Balken, wie es in den ausgestellten Gebäuden des Museums und in der damaligen Zeit eigentlich selbstverständlich war.



Abbildung 1 Bild zu einem wiederverwendeten Eichenbalken (Foto Klara Bunzel)

Vermutlich hätte niemand aus dieser Zeit einen beispielsweise sechs Meter langen Eichenbalken weggeworfen, nur weil die zimmermannsmäßigen Anschlüsse und Bohrungen, Nut und Zapfen möglicherweise an der falschen Stelle waren. Einmal behauenes oder zugesägtes Material wurde soweit wie möglich wiederverwendet, was zeigt, dass Urban Mining keine Erfindung der heutigen Zeit ist (vgl. Abbildung 1).

Als ein wesentlicher Baustein in der Ökobilanz wurden die verbleibenden Bauteile aus Beton identifiziert, weswegen mit verschiedenen Strategien versucht wurde, den hier notwendigen Einsatz des Materials so umweltfreundlich wie möglich zu gestalten (vgl. Kap. 1.3.4).

Des Weiteren wurde im Zuge der ersten Stufe festgestellt, dass die in den Datensätzen der Umweltproduktdeklarationen (EPDs) in der Datenbank der Oekobau.dat [2] aufgeführten Werte und Angaben zum Transport der Baustoffe lückenhaft und ungenau sind. Entsprechend wurde für die zweite Stufe das Ziel formuliert, den Einfluss von Regionalität und den damit einhergehenden kurzen Transportwegen von Baustoffen auf die Nachhaltigkeit des Gebäudes zu erforschen.

Die heutigen Ökobilanzen erfassen im Wesentlichen die Transporte innerhalb des Produktionsprozesses (vgl. Kap. 1.1.5), was zu allgemein gültigen Daten führt, die für verschiedene Bauvorhaben verwendet werden können. Für den Neubau des Eingangs- und Veranstaltungsgebäudes in Detmold soll hier jedoch die Bedeutung einer regionalen Materialversorgung untersucht werden, wobei besonderer Fokus auf den Anteil der Transporte von der Produktionsstätte zur Baustelle gelegt wird. Diese Forschungsarbeit zielt darauf ab, die ökologische und ökonomische Bedeutung der Regionalität von Baustoffen im Bauwesen umfassend zu analysieren. Hierfür sind folgende Schritte und Ziele vorgesehen:

1.1.3 Methodisches Vorgehen

In der ersten Phase wurden acms - Architekten im Allgemeinen von den Kooperationspartnern des Forschungsprojekts hinsichtlich emissionsarmer Baustoffe beraten, u.a. um die angestrebte DGNB-Zertifizierung zu unterstützen. Dies umfasste Vorschläge für Baustoffe, die sich durch eine besonders geringe Emission auszeichnen (Stroh, Lehm, Holz).

In der zweiten Phase wird die bestehende Ökobilanzierung aus der Forschungsphase I fortgeführt und in den vorhandenen Rechenmodellen angepasst. Dabei werden alle in der

ersten Phase empfohlenen Baustoffe aus ökologischer Sicht dargestellt und verglichen. Es wird ein „Ist-Zustand“ als Rechengrundlage für die Ökobilanzierung des anhand der Plandaten aus der Ausführungsplanung des Gebäudes erstellt.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Primärkonstruktion, insbesondere den Materialien Holz, Lehm und Beton. Hierbei wird die Transportenergie im Verhältnis zur Primärenergie quantifiziert. Des Weiteren wird die Regionalität der Baustoffe innerhalb der Ökobilanzierung und Lebenszyklusanalyse bewertet. Es wird geprüft, ob die Zielvorgabe einer maximalen Transportdistanz der verwendeten Baustoffe von 200 km realisierbar ist/war. Dazu werden die benötigten Baustoffqualitäten definiert und die regionale Verfügbarkeit von Baustoffen aus nachhaltigen Quellen geprüft. Gegebenenfalls wird auch die Eignung und Verfügbarkeit regionaler Recyclingbaustoffe untersucht.

Schließlich wird die Recyclingfähigkeit bzw. die CO₂-Aufnahme von verbauten Materialien wie Altholz und Ökobeton bestimmt, um deren Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu bewerten. Hierbei wird zwischen A1 bis A3, A4 und D differenziert.

In einem eigenen Abschnitt der Arbeit werden zudem die Ergebnisse aus den Recherchen zum Stand des Wissens im Bereich CO₂-reduzierter Zement- und Betonbauteile aufgeführt. Alternativen zum konventionellen Betonbau werden erarbeitet und vorgeschlagen, abhängig von den Anforderungen an die Bauteile. Auf diese Weise werden alternative Konstruktionen und Konstruktionstechniken für Architekten und Tragwerksplaner in zukünftigen Projekten vorgestellt.

Die Einbindung der Forschungsergebnisse in das laufende Bauvorhaben erfolgte im Rahmen der ZiE für die Ökobetone und im Rahmen der weiteren Erstellung bauordnungsrechtlicher Nachweise und der Erlangung behördlicher Zustimmungen. Für den Ökobeton wurden die Planungs- und Lebenszykluskosten im Vergleich zu konventionellen Betonen bewertet.

Rückbau- und Nachnutzungsszenarien für den Ökobeton werden aufgezeigt, und ein Maßnahmenkatalog sowie Empfehlungen zum materialgerechten Umgang auf der Baustelle werden erstellt.

In der ersten Stufe des Forschungsvorhabens wurde eine Ökobilanz für die relevanten Primärkonstruktionen des Gebäudes durchgeführt und mit einem Referenzgebäude in der damals üblichen Bauweise in Massivbau (Stahlbeton und KS) verglichen (s. Bericht zur ersten Stufe [1]); In dieser zweiten Stufe des Projektes wurde ein vertiefender Einstieg in die Materie gesucht; aus diesem Grund wurde/wird eine Analyse zu den wesentlichen Baustoffen im Gebäude (Holz, Lehm, Beton) mit den wichtigsten Kerndaten vorgenommen.

1.1.4 Abgrenzung des Themas

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit vorgenommene Ökobilanzierung dient nicht der Nachhaltigkeitszertifizierung nach DGNB oder ähnlicher Zertifizierungssysteme. Eine derartige Betrachtung findet gesondert durch das Büro MNP aus Lübeck statt. Die im Rahmen dieser Arbeit fokussierten Forschungsschwerpunkte sind die Analyse und Ermittlung der Transportemissionen im Vorfeld festgelegter Baustoffe, der Nachweis und die Bewertung der Regionalität zentraler Baustoffe. Ferner sollten die Daten der Ökobilanzierung die für diesen Forschungsschwerpunkt vorgenommen wurde mit denen der DGNB nicht verglichen werden. Das liegt an der fehlenden Betrachtung der KG 400, der technische Anlagen und der

bewussten Entscheidung, hier keine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse aller notwendigen Module (A-D) analog zur DGNB Zertifizierung vorzunehmen.

1.1.5 Theoretische Grundlagen zum Forschungsschwerpunkt der Stufe II

1.1.5.1 Ökobilanzierung von Gebäuden

Das so genannte „3-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit“ umfasst wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte, die alle gleich wichtig sind, um nachhaltige Entwicklung zu erreichen. Zusätzlich zu diesen drei Säulen werden in der Praxis oft auch technische Qualität, Prozessqualität und Standortqualität berücksichtigt. Diese zusätzlichen Dimensionen erweitern den Ansatz, indem sie die technischen Eigenschaften von Gebäuden, die Qualität der Bauprozesse und die Einflüsse des Standortes mit einbeziehen.

Innerhalb der ökologischen Säule spielt die Ökobilanzierung eine zentrale Rolle. Die Ökobilanzierung, auch Lebenszyklusanalyse (LCA) genannt, ist ein Verfahren zur Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen über deren gesamten Lebenszyklus hinweg. Dies beinhaltet die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Ziel der Ökobilanzierung ist es, die ökologischen Auswirkungen zu messen und zu analysieren, um umweltfreundlichere Entscheidungen zu treffen.

Im Rahmen der ökologischen Säule des 3-Säulen-Modells hilft die Ökobilanzierung, negative Umweltauswirkungen zu erkennen und zu verringern. Durch die Analyse können Unternehmen und Entscheidungsträger Schwachstellen in ihren Prozessen finden und Verbesserungen vornehmen, wie z.B. die Reduktion von Treibhausgasemissionen, die Nutzung erneuerbarer Energien oder die Verbesserung von Recyclingverfahren.

Die Einbindung der Ökobilanzierung in betriebliche und politische Entscheidungen trägt zur ökologischen Effizienz bei und unterstützt die übergeordneten Nachhaltigkeitsziele. Unternehmen können durch transparente Darstellung und kontinuierliche Verbesserung ihrer Umweltauswirkungen ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und gleichzeitig ihrer gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden. Dies hat oft auch positive wirtschaftliche und soziale Effekte.

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) und das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) beziehen sich ebenfalls auf diese Prinzipien. Die DGNB bewertet Gebäude nach einem umfassenden Kriterienkatalog, der neben den drei klassischen Säulen der Nachhaltigkeit (vgl. auch technische Qualität, Prozessqualität und Standortqualität) umfasst. Die Ökobilanzierung ist dabei ein wichtiges Instrument zur Bewertung der ökologischen Qualität eines Gebäudes. Das QNG ergänzt diese Ansätze, indem es spezifische Anforderungen und Kriterien für nachhaltige Gebäude in Deutschland definiert.

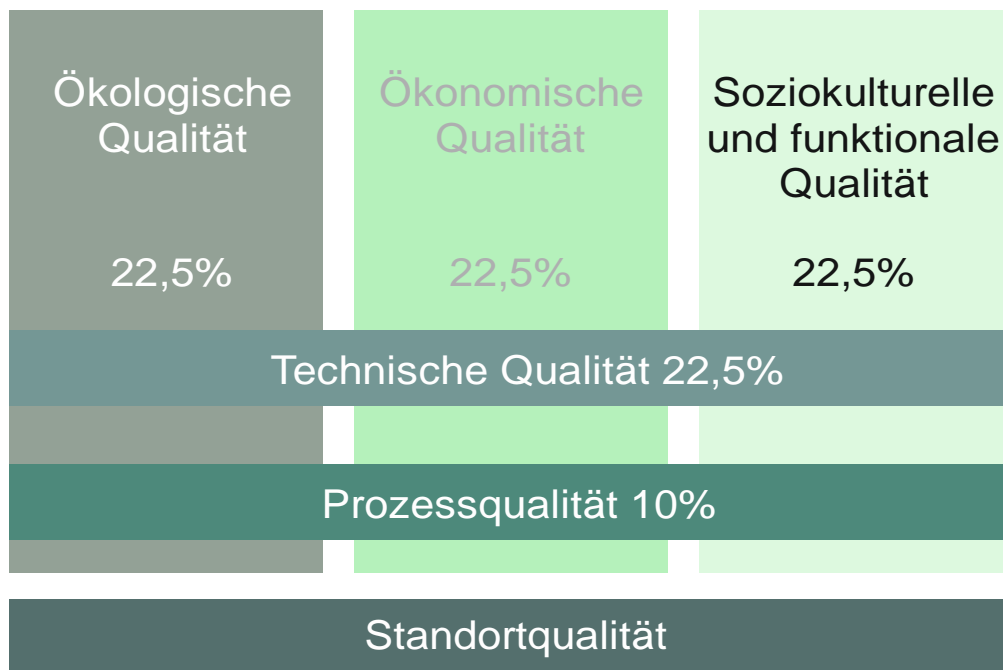


Abbildung 2 Die drei Säulen der Nachhaltigkeit nach DGNB [eigene Darstellung]

Die Ökobilanzierung zielt darauf ab, die Umweltauswirkungen eines Gebäudes entlang seines gesamten Lebenszyklus zu bewerten. Dieser Lebenszyklus umfasst die in so genannte Module gegliederten „Lebensphasen“ eines Bauelements (vgl. Abbildung 3). Die Ökobilanzierung beginnt mit der Festlegung des Untersuchungsumfangs, in dem definiert wird, welche Umweltauswirkungen betrachtet werden sollen, wie beispielsweise Treibhausgasemissionen, Energie- und Wasserverbrauch sowie Luft- und Wasserverschmutzung.

Daraufhin erfolgt die Datensammlung, bei der Informationen über Materialien, Transport, Energieverbrauch während des Baus, Nutzung und Betrieb des Gebäudes sowie über die Entsorgung oder das Recycling am Ende seiner Lebensdauer gesammelt werden. Diese Daten werden von vielen Herstellern in so genannten Umweltproduktdeklarationen (EPDs) gesammelt und sind unter anderem im deutschsprachigen Raum auf der Online-Datenbank Oekobau.dat anzufinden.

Anschließend wird eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt, um die Umweltauswirkungen jedes Aspekts des Gebäudes zu quantifizieren. Dabei können speziell dafür entwickelte Softwaretools eingesetzt werden, die verschiedene Umweltindikatoren berücksichtigen.

Die gesammelten Daten werden dann bewertet, um Optimierungspotenziale zu identifizieren bzw. Bereiche, in denen die Umweltauswirkungen am größten sind. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse werden Verbesserungsvorschläge gemacht, um den ökologischen Fußabdruck des Gebäudes zu verringern. Dies kann den Einsatz nachhaltiger Baumaterialien, energieeffizienter Technologien oder die Optimierung der Gebäudegestaltung umfassen.

1.1.5.2 Lebenszyklusanalyse von Gebäuden

Zusammengefasst können die Lebenszyklus Phasen eines Gebäudes in die Herstellung die Nutzung und den Rückbau oder Abriss unterteilt werden. Für die Lebenszyklusanalyse bietet

die DIN 15 804 eine feinere Unterteilung in Modulen an: Das Modul A umfasst die Produktion Komma bei einem Gebäude also beispielsweise die Herstellung der Baustoffe und die Errichtung des Gebäudes. Im Modul B wird die Nutzungsphase berücksichtigt, hierzu zählen Instandsetzung und Wartungsaufwand aber im Fall eines Gebäudes auch der Energieaufwand für die Beheizung Kühlung Lüftung usw. Vom Modul C an wird die Nachnutzung betrachtet Punkt für Gebäude bedeutet das den Abriss aha den Abtransport und im besten Fall die Aufbereitung und Wiederverwendung der Baustoffe. Letztere soll im Modul D abgebildet werden.

Hierbei existieren gesicherte Datenlagen im Grunde genommen fast nur für A1 bis A3, Transporte zur Baustelle (A4) sind höchst individuell und können maximal als pauschaler Mittelwert oder für den individuellen Einzelfall festgestellt werden. Gleichzeitig ist ihr Einfluss nicht zu vernachlässigen (siehe Kapitel 1.2.2).

Mit dem Einfluss des Modules A5 hat sich die Hochschule Ostwestfalen auseinandergesetzt.

Vergleichsweise gut ist die Datenlage zum Modul B, hier können zum Beispiel die Bedarfswerte aus der gegebenen Rechnung nach DIN 18599 oder pauschale Erneuerungszyklen nach VDI 2067 angesetzt werden, so das bereits vor der Errichtung des Gebäudes Aussagen über die Umweltwirkung bestimmter Maßnahmen möglich werden. Es ist jedoch anzumerken, dass sowohl die Realverbrauchswerte der aufzuwendenden Versorgungsenergie als auch die tatsächlichen in Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen von diesen pauschalen Annahmen zu Vorhabens beginnen abweichen, zum Beispiel bei den GEG- Berechnungen in einem nicht unerheblichen Maße von bis zu 50% [2].

Abbildung 3 zeigt diese Module noch einmal im Überblick nach [4]

Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach DIN EN 15804				
Modul A		Modul B	Modul C	Modul D
Herstellungsphase	Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase	Vorteile & Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 – A3	A4 – A5	B1 – B7	C1 – C4	D
A1 Rohstoffbereitstellung A2 Transport A3 Baustoffherstellung	A4 Transport A5 Bau / Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Reparatur B4 Ersatz B5 Umbau / Erneuerung	C1 Abbruch C2 Transport C3 Abfallbewirtschaftung C4 Deponierung	D Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial
		B6 Betrieblicher Energieeinsatz B7 Betrieblicher Wassereinsatz		



Stand: 11/2022

Abbildung 3 Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach DIN EN 15804 [3]

1.1.5.3 Umweltproduktdeklarationen EPDs

Die Ökobilanzierung als ein Baustein der Lebenszyklusanalyse erfolgt auf der Grundlage von Umweltproduktdeklarationen, beziehungsweise der ökobau.dat, einer Datenbank des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauen [4].

Umweltdeklarationen, auch bekannt als Umweltproduktdeklarationen oder EPDs, stellen umfassende umweltbezogene Daten auf Basis vordefinierter Parameter bereit. Die Abkürzung EPD leitet sich vom englischen Begriff "Environmental Product Declaration" ab. Eine EPD enthält primär Ökobilanzdaten, die Ressourcenbedarf, Abfallmengen und Umweltwirkungskategorien umfassen. Zusätzlich zu den ökologischen Informationen enthalten EPDs auch wichtige technisch-funktionale Merkmale des Produkts. Diese Daten ermöglichen es, die Produkte in Ökobilanzen von Bauteilen und Gebäuden zu integrieren oder ähnliche Produkte miteinander zu vergleichen.

Die Hauptnutzung von Umweltdeklarationen liegt im Austausch von Informationen innerhalb der Wirtschaft, insbesondere zwischen Anbietern und Kunden.

Für die Erforschung der primären Baustoffe (Holz, Lehm, Beton) im Hauptteil dieser Arbeit wurden folgende Umweltindikatoren ausgewählt:

- Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergieträger ohne die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger (PE NRE)
- Einsatz erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Energieträger (PE RE)
- Globales Treibhauspotenzial (GWP)

Wie bereits in der ersten Stufe des Forschungsprojekts wurden die folgenden Umweltindikatoren nicht betrachtet, auch wenn Sie in den Berechnungen teilweise mitgeführt wurden:

- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)
- Eutrophierungspotenzial (EP)
- Versauerungspotenzial (AP)
- Potenzial zur Bildung für troposphärisches Ozon (POCP)

Hierbei bedeutet:

PE_{ne}: Die *Primärenergie nicht erneuerbar* beschreibt den Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie für einen Prozess (inkl. der ggf. auch erneuerbaren Primärenergieträger die in dem Prozess verbraucht werden. Ziel dieser Kategorie ist die Schonung fossiler Ressourcen, in dem niedrige Werte angestrebt werden sollen

PE_e: Die *erneuerbare Primärenergie* beschreibt den Gesamteinsatz erneuerbarer *Primärenergie für einen Prozess (inkl. der erneuerbaren Primärenergieträger)*. Ziel dieser Kategorie ist der Ausbau und verstärkte Einsatz erneuerbarer Energie.

GWP: das *Global Warming Potential*, oder auf Deutsch Treibhauspotential fasst die Wirkung/Menge verschiedener Gase zusammen, die am sog. Treibhauseffekt, also der Reflektion der infraroten Strahlung an der Erdatmosphäre und damit an der globalen Erwärmung beteiligt sind. Referenzgröße ist der Leitindex CO₂ auf den die anderen Gase

definierten Faktoren je nach ihrer Schädlichkeit und Verweildauer in der Atmosphäre umgerechnet werden. Dieses Kriterium ist aus Sicht des Forschungsteams im Hinblick auf den Klimawandel aktuell das Bedeutendste.

1.1.6 Definition Regionalität

1.1.6.1 Untersuchung der Regionalität der Baustoffe: 200km Radius zur Baustelle

Der Begriff Regionalität stammt aus dem Lebensmittelsektor und beschreibt den Anbau, Transport und Verkauf von regional erzeugten Lebensmitteln. Die genaue Entfernung zwischen Ursprungsort und Verkaufsort bzw. Anwendungsort ist dabei nicht genau definiert.

Aus der Begriffsdefinition von „Region“ lässt sich die minimale bzw. maximale räumliche Ausdehnung, die eine Region beinhaltet ebenfalls nicht ableiten. Umgangssprachlich beschreibt der Begriff „Region“ eine Ausdehnung beispielsweise im geographischen Sinne, die über die unmittelbare Umgebung eines Ortes hinausgeht in einer meist undefinierten Ausdehnung. [5]

Im Zuge des Forschungsprojektes sollte versucht werden, den Ansatz aus der Lebensmittelerzeugung wieder regional erzeugte Nahrungsmittel in Läden innerhalb ihrer Region anzubieten auf Gebäude zu übertragen. Aus diesem Grund wurde gemeinsam mit den Architekten ein Radius von 200km festgelegt bei den Baustoffen deren Ursprung innerhalb dieses Radius liegen als regional angesehen werden.

Immer wieder stößt man auch in der Baubranche an vergleichbare Grenzen: Handwerker teilweise auch Planer werden in vielen Fällen gerne aus der „Region“ genommen, dies erleichtert in der Regel die Kommunikation, Reklamationen aber auch schlichtweg die Reparierbarkeit von Anlagen oder Werken. Zumindest letzteres ist nach Ansicht der Autoren auch ein klarer Aspekt der Nachhaltigkeit.



Abbildung 4 Definiertes 200km Radius um das FLM Detmold

1.1.6.2 Baustoffe aus regionalem Ursprung nur eingeschränkt möglich

Das Vergaberecht basiert auf dem Prinzip des freien und fairen Wettbewerbs. Öffentliche Aufträge müssen in der Regel und ab einem bestimmten Schwellenwert europaweit ausgeschrieben werden, um sicherzustellen, dass alle potenziellen Anbieter die gleichen Chancen haben, am Ausschreibungsverfahren teilzunehmen. Dieses Prinzip verhindert eine gezielte Bevorzugung regionaler Anbieter und fördert den Wettbewerb zwischen Unternehmen aus verschiedenen Regionen und Ländern. [6]

Im Lebensmittelbereich ist eine regionale Vergabe/ Bevorzugung allerdings möglich: So findet man auf der Webseite „vergabe24.de den Hinweis: „*„Regionalität“ als Kriterium kann vergaberechtskonform sein. Es muss dann aber als Qualitätsmerkmal im Sinne materieller Qualität verstanden werden*“ [6]. Übertragen auf den Bausektor bedeutet dies, dass im Grunde nur über Qualitätsmerkmale in einer Ausschreibung ein Kriterium geschaffen werden kann, welches nur durch einen regionalen Anbieter bedient werden kann.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Innovationsanspruch geltend zu machen. Hierzu bietet die Europäische Union gleich mehrere Handlungsempfehlungen und Informationsplattformen an [8]. Diese Option richtet sich Behörden, politische Entscheidungsträger, Wissenschaftler und andere Interessenträger, die in Ihren Projekten innovative Maßnahmen planen, die ggf. nur von bestimmten Anbietern zu erfüllen sind.

Unbenommen bleibt natürlich auch in diesem Fall die konkrete Beschreibung von Dienstleistung oder Produkt, die den Kreis der Anbieter über die Möglichkeiten zur Zielerfüllung reduziert. Dies bedeutet aber auch, dass die Kriterien für die Auswahl der Auftragnehmer klar und objektiv sein müssen. Insbesondere innerhalb der Europäischen Union sind die Vergaberechtsvorschriften darauf ausgelegt, den Binnenmarkt zu fördern und Handelshemmnisse abzubauen. Die EU-Vergaberichtlinien verlangen, dass öffentliche Aufträge offen und diskriminierungsfrei ausgeschrieben werden, um den freien Waren- und Dienstleistungsverkehr zu gewährleisten [9]. Hinzukommt, dass die Wirtschaftlichkeit und Effizienz bei der Vergabe von Aufträgen zu gewährleisten ist. In der Regel muss das günstigste Angebot ausgewählt werden – welches nicht zwingend von einem regionalen Anbieter stammen muss.

Für das Projekt konnten grundsätzlich beide o.g. Ansätze des Vergaberechtes gewählt werden, um die gewünschte Regionalität in der Vergabe abzubilden. Informationen zur Umsetzung finden sich in Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

1.1.7 Ökologischer Transportaufwand von Baustoffen

Um die Bedeutung der Regionalität im Projekt zu erforschen, wurden drei Module in der Lebenszyklusanalyse zur Ermittlung und Datenerhebung von ökologischen Auswirkungen des Transports von Baustoffen identifiziert: die Module A2, A4 und C2. [3]

Das Modul A2 der Lebenszyklusanalyse eines Bauprojekts befasst sich mit dem Transport der Rohstoffe zum Herstellungsort der Baustoffe. Dieses Modul sollte alle Aktivitäten und Prozesse umfassen, die mit dem Transport der Rohstoffe von ihren Abbau- oder Produktionsstandorten zu den Herstellungsorten der Baustoffe verbunden sind.

Das Modul A4 der Lebenszyklusanalyse (LCA) eines Bauprojekts befasst sich mit dem Transport der Baustoffe vom Hersteller zur Baustelle.

Modul C2 der Lebenszyklusanalyse (LCA) eines Bauprojekts widmet sich dem Transport der Rückbaumaterialien zur Entsorgungs- oder Recyclingstelle.

Auf der Basis des Treibstoffverbrauches und der daraus resultierenden Emissionen, können dann im nächsten Schritt sogenannte Tonnenkilometer definiert werden, also eine Rechengröße, die sich nur auf das beförderte Gewicht und die zurückgelegte Entfernung bezieht. Dabei werden die Effizienz der Transportmittel und die Art des verwendeten Treibstoffs durch die Unterscheidung des Transportmittels berücksichtigt.

Einflussgrößen sind entsprechend:

- Die Entfernungen der Rohstoffe bis zum Hersteller, vom Hersteller bis zur Baustelle und in C2 von der Baustelle zurück zum Hersteller/ Aufbereiter
- Das gewählte Transportmittel (oder eine Mischung aus diesen)
- Die angesetzte Rohdichte des Produktes

Im vorliegenden Fall wurde überwiegend von einem Transport per LKW ausgegangen (EPD/Oekobau.dat).

Bei genauerer und reflektierender Betrachtung der Transporte stellt man fest, dass die Transportvorgänge A2 bis C2 eigentlich nicht in einer allgemeinen Datenbank geregelt sein

können, sondern dass die Distanzen zwischen Hersteller und Baustelle tatsächlich individuell für das jeweilige Bauvorhaben und Material berechnet werden müssten, um individuelle Entscheidungen treffen zu können. Das Problem ist, dass hierdurch die allgemeine Vergleichbarkeit von Gebäuden gleicher Nutzung erschwert wird. Einige der Datensätze versuchen dies mit pauschalen Angaben (z.B. 30 km) in ihrer Bilanz mitabzubilden, eine Distanz, die dann auch für die Transporte zum Entsorger (C2) wieder aufgegriffen wird/werden kann. Für die spezialisierten Hersteller eines sehr ökologischen Materials ist es natürlich auch nicht von Interesse lange Transportwege berücksichtigt zu sehen. In der Praxis kann es aber hierdurch vorkommen, dass ein zunächst weniger ökologisch wirkendes Produkt durch die regionale Verfügbarkeit für die konkrete Bauaufgabe zu einer besseren Wirkungsbilanz führt. [10]

1.2 Arbeitspaket 5.1: Fortführung der Ökobilanz; Analyse der Gesamtökobilanz des Neubaus FLM Detmold

1.2.1 Fortführung der Rechenmodelle / Ist-Zustand Gebäude

In der ersten Forschungsphase wurde zur Untersuchung geeigneter Baustoffkombinationen in eine konventionelle Bauweise und in eine Forschungsversion, die besonderes Augenmerk auf eine ressourcenschonende und CO₂-Emissionsarme Bauweise legt, unterschieden. Dabei lag der Fokus auf dem Energieverbrauch aus erneuerbaren Energien (PE_e), dem Energieverbrauch aus nicht erneuerbaren Energien (PE_{ne}), und dem globalen Treihausgaspotenzial (GWP). Während dieser Zeit befand sich das Gebäude in der Entwurfsphase. Zum jetzigen Berichtszeitpunkt in der ersten Jahreshälfte 2024 ist das Gebäude im Bau und alle konstruktiven und baustoffrelevanten Aspekte sind festgelegt.

Aufbauend auf der Ökobilanz und unter Verwendung der vorhandenen Rechenmodelle, die im Verlauf der Planung während der ersten Forschungsphase erstellt wurden, erfolgt in dieser Phase eine erneute, aber immer noch vereinfachte Ökobilanzierung, welche den IST-Zustand des Gebäudes widerspiegelt und mit den vorherigen Ergebnissen vergleichbar sein soll. Die nachstehende Betrachtung dient insofern in erster Linie zur Abbildung der Relevanz von Transportkosten und Regionalität sowie einer Diskussion um die in der Ökobau.dat verwendeten Datensätze.

Bei der Untersuchung des Gebäudes in zwei Varianten, der konventionellen Version und der Forschungsversion kam bei letzterer eine negative CO₂ Bilanz raus. Grund dafür ist unter anderem das im Bauholz gebundene CO₂ und das mit einbezogene Recyclingpotenzial (Modul D) der einzelnen Baustoffe. Des Weiteren haben sich im Verlauf der Planung Bauteilmassen und Aufbauten verändert. Der Anteil an Beton hat sich im Vergleich zur Forschungsversion beinahe verdoppelt. Für die Ökobilanzierung innerhalb dieser Arbeit werden ausschließlich die Module A1-3, A4 (sofern vorhanden) und D in die Berechnungen mit aufgenommen.

Im Rahmen des Bauvorhabens stehen die spezifischen Baustoffe Holz, Beton und Lehm im Fokus. Besonders hervorzuheben ist, dass derzeit nur für den Baustoff Holz und Beton detaillierte Daten zu den Massen und Lieferwegen, jedoch nur für den Transport zur Baustelle

vorliegen. Diese Informationen sind entscheidend, um eine fundierte Analyse der ökologischen Auswirkungen des Materialeinsatzes und der damit verbundenen Transportwege durchzuführen.

Die verfügbaren Daten zu Holz und Beton umfassen sowohl das Gewicht der gelieferten Mengen als auch die Distanz und Art der Transportwege vom Lieferanten zur Baustelle. Diese Informationen ermöglichen es, den CO₂-Ausstoß und die Energiekosten, die durch den Transport des Holzes und Betons verursacht werden, genau zu berechnen. Dadurch lässt sich der ökologische Fußabdruck des Bauvorhabens detailliert darstellen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen ableiten.

Stampflehm ist ebenfalls eine wesentliche Komponente des Bauprojekts, jedoch fehlen bisher konkrete Angaben zu deren Massen und den genauen Transportwegen. Zur Bewertung dieses Baustoffs wurden daher Transporte von den Standorten der jeweiligen Anbieter (Firma Conluto, Ibbenbüren) als Fahrstrecken angenommen. Im Folgenden werden diese Themen für die genannten Primärbaustoffe dargelegt und diskutiert.

Die Betrachtung innerhalb der Ökobilanzierung fokussiert sich dabei auf die Module der Lebenszyklusanalyse A1-3, A4, und D.

Im Vergleich zu den Betonbauteilen und den darin enthaltenen Bewehrungsstahl weist das im Neubau verbaute Holz, den niedrigsten Energiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien auf, während der Herstellungsphasen A1-3. Es bezieht 85% der benötigten Herstellungsenergie aus erneuerbaren Energien (siehe Diagramm, PE e) und erhält eine negative CO₂-Bilanz durch die Eigenschaft CO₂ langfristig zu binden. Das nachfolgende Kapitel vertieft die Ökobilanzen von Holz, Beton, Bewehrungsstahl und Lehm.

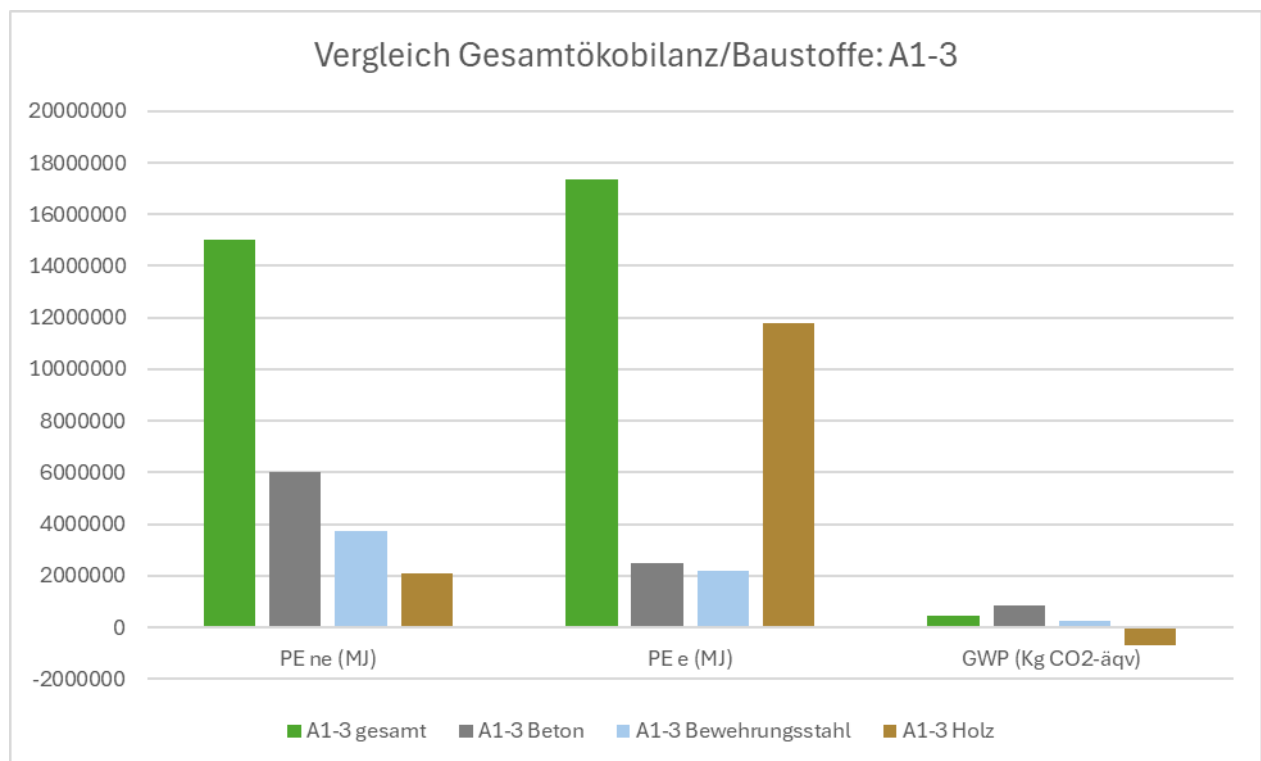


Abbildung 5 Vergleich der drei Primärbaustoffe Holz Beton und Stahl für den Neubau des FLM

Ökobilanz Holz



Abbildung 6 Wettbewerbsvisualisierung für das neue Foyer und Empfangsgebäude des Freilichtmuseums Detmold (Bildquelle: acms-Architekten, Wuppertal)

Im Freilichtmuseum Detmold wurden nach aktueller Berechnung ca. 1063 m³ Holz für das Tragwerk des Gebäudes eingebaut. Die Holzmassen für die Wandaufbauten und Fassade werden separat gerechnet, da hier keine Lieferscheine und gesonderte Massewerte von dem ausführenden Unternehmen vorliegen.

Das Holz für die Tragkonstruktionen, welches von der Firma Terhalle geplant und ausgeführt wird, wurde im Wesentlichen von zwei Firmen geliefert: Beide Holzverarbeitungsfirmen, Holzius und Mayr Melnhof, beziehen ihr Holz von holzerzeugenden Betrieben, die in den Prozess der Rodung und Trocknung eingebunden sind und das verarbeitete Holz an die jeweiligen Firmen liefern. Diese holzerzeugenden Betriebe sind geografisch weit verteilt und erstrecken sich über die deutschen Staatsgrenzen hinaus. Die Wahl der Lieferanten Holzius und Mayr Melnhof erfolgte aufgrund ihrer spezifischen Expertise und der Qualität ihrer Produkte, die den Anforderungen des Projekts entsprechen.

Nach Anfrage über Auskunft zu den jeweiligen Wuchsorten der für das Bauholz gerodeten Bäume betonte das Unternehmen wie schwer es sei, die genauen Ursprünge und Anzahl verarbeiteter Bäume für jedes Stück KVH oder BSH nachzuvollziehen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass das Rohmaterial aus verschiedenen Quellen im Produktionsprozess vermischt wird. Dies erschwert die präzise Dokumentation der Holzherkunft und stellt ein Problem für die Transparenz und Nachverfolgbarkeit dar.

Das Schnittholz aus Fichte, welches als Ausgangsmaterial für die Weiterverarbeitung und Erzeugung von Konstruktionsvollholz (KVH) und Brettschichtholz (BSH) benötigt wird, stammt aus Deutschland, Tschechien, Schweden und Österreich (nach Angaben der Firma Mayr Melnhof). Dieses Holz bildet die Grundlage für die strukturellen Komponenten des Gebäudes. In der Praxis kann das Schnittholz für einen einzelnen KVH-Balken aus mehreren dieser Länder stammen, was die Komplexität der Lieferketten erhöht.

Ein Beispiel für die Herausforderungen bei der Rückverfolgbarkeit der Holzherkunft ist das Unternehmen Mayr Melnhof. Das Brettschichtholz stammt von der Firma Mayr Melnhof, die

Holz aus drei verschiedenen Standorten bezieht: Olsberg, Leoben und Reuthe. Die Entfernungen von diesen Standorten zur Baustelle variieren erheblich.

Die Notwendigkeit, Schnittholz aus nicht-regionalen Quellen zu beziehen, ergibt sich hierbei aus mehreren Gründen. Klimatische und ökologische Faktoren spielen dabei eine entscheidende Rolle. Dürreperioden, die durch den Klimawandel verstärkt werden, können die Verfügbarkeit von lokalem Holz stark beeinträchtigen [2]. Dürre schwächt das Wachstum der Bäume und erhöht ihre Anfälligkeit für Schädlinge. Ein besonders zerstörerischer Schädling ist der Borkenkäfer, der große Waldflächen befällt und schwere Schäden verursacht. Diese Insekten vermehren sich besonders bei warmen und trockenen Bedingungen, was zu einem massiven Absterben von Bäumen führt. Angesichts solcher Herausforderungen muss die Holzindustrie oft auf Holz aus weiter entfernten Regionen zurückgreifen, um die Nachfrage zu decken und die Kontinuität der Produktion zu gewährleisten.



Abb. 1 Kahlschlag im Hochsauerlandkreis (Nähe Büren) nach Befall mit Borkenkäfern, Dürre und Starkwindereignissen (Foto: VH)

Brettschichtholz		Konstruktionsvollholz	
3S-Platte Fichte	0,057 m ³	Holzstabelbinder C24 SI	15,844 m ³
BSP-Decke	361,953 m ³	Holzstabelbinder ROH C24 SI	22,827 m ³
GL 24 c NSI	314,471 m ³	Fichte	93,041 m ³
GL 24 c SI	47,392 m ³	KVH C24 NSI	42,240 m ³
GL 24 h SI	3,939 m ³	NH C24	3,018 m ³
GL 28 c NSI	25,749 m ³	Summe	176,970 m³
GL 30 c NSI	27,103 m ³		
GL 30 c SI	27,103 m ³	Balkenschichtholz	
Summe	807,767 m³	TrioHolz C24	20,453 m ³
		Summe	20,453 m³
		Gesamt	
Oriented Strand Board Platten		Summe	1012,411 m³
OSB	7,221 m ³		
Summe	7,221 m³		

Abb. 2 Tabelle mit der Auflistung aller im Gebäude verbauten Holzmassen für die Tragkonstruktion

Die Firma Terhalle hinterlegt regelmäßig die aktuellen Lieferscheine der Bauholzlieferungen auf den von allen Projektbeteiligten gemeinschaftlich genutzten Sever ab. Da das Gebäude sich noch im Bau befindet und die Holzbauarbeiten zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen sind, liegt der aktuelle Lieferwert bei ca. 400 m³. Aus den jeweiligen Lieferscheinen und nach Rücksprache mit den zuständigen Mitarbeitern von dem Zulieferer Mayr Melnhof lassen sich drei Ursprungsorte für das Bauholz ermitteln. Die Firma erstreckt sich über mehrere Standorte in Deutschland und Österreich. Daher werden bisher ca. 58 m³ aus Reuthe (ca. 634km bis FLM Detmold) und 42 m³ aus Leoben (ca. 851km bis FLM Detmold), die jeweils in Österreich liegen und ca. 143 m³ aus Olsberg (ca. 82km bis FLM Detmold) in Deutschland geliefert. Daraus ergibt sich eine Gesamtkilometerzahl von ca. 1.567km. Hinzu kommt der zweite Zulieferer, der hauptsächlich Konstruktionsvollholz (KVH) liefert.

Die Firma Holzius Vollholzhaus hat ihren Sitz in Südtirol, Italien. Die zur Verfügung stehenden Lieferscheine ergeben eine Masse von ca. 176 m³ KVH. Diese wurden aus Südtirol über eine Strecke von ca. 751km transportiert und zur Baustelle in Detmold geliefert. Das Gewicht der Lieferungen von Mayr Melnhof beläuft sich auf ca. 106t, dass der Firma Holzius auf ca. 79t. Mit Hilfe der EPD für LKW-Emissionen lässt sich anschließend ein Wert für das Modul A4 berechnen der für das gesamte Holz näherungsweise angenommen werden kann. Er dient in den Berechnungen der Ökobilanz als real ermittelter Wert für die Umweltindikatoren des Moduls A4.

Ergebnisse aus den Ökobilanzberechnungen

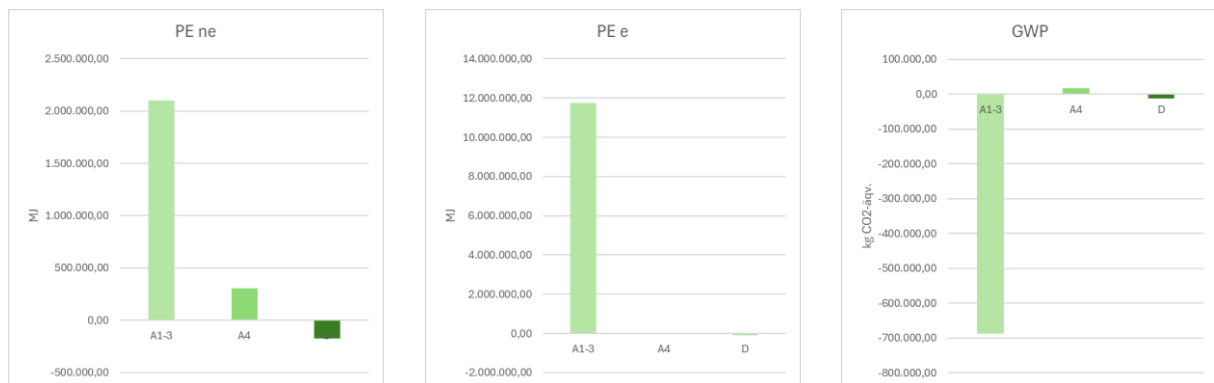


Abb. 3 Ergebnisse der relevanten Umweltindikatoren für Holz (ganzes Gebäude)

Nach der Ermittlung der Werte für das Modul A4 werden die vier Holzwerkstoffkategorien EPDs der Oekobau.dat zugewiesen und in die Berechnungen der Ökobilanz des Gebäudes aufgenommen.

Wie im Vorfeld bereits erwartet, fallen die Werte für das GWP insgesamt negativ aus, da das verarbeitete Holz das vor der Rodung gebundene CO₂ noch enthält. Der GWP-Wert von -683,1t CO₂-Äqv. wertet die Gesamtbilanz des Gebäudes stärker als jeder andere verwendete und in die Berechnungen einbezogene Baustoff auf. Der zuvor auf Basis realer Werte ermittelte A4-Wert wirkt sich mit nur etwa 3% sehr gering auf die Gesamtbilanz des Gebäudes aus. Dafür ist der Einfluss auf bezogen auf die Herstellung des Holzes sehr groß (s. Abbildung

15). Im Vergleich mit den Werten beim GWP ist der Einfluss von A4 und D größer. Der Energieverbrauch aus erneuerbaren Energien (PE e) demonstriert die klimaneutrale Erzeugung des Rohstoffs, da er von allein und mit Hilfe von natürlichen regenerativen Energien wächst. Die ca. 2,1 Mio MJ die aus nicht erneuerbaren Energien (PE ne) bezogen werden, lassen sich vermutlich auf die Verarbeitung des Rohholzes zu Bauholz zurückführen.

Diskussion - Negative CO2 Bilanz von Bauholz

Wälder bedeckten ursprünglich nahezu den gesamten Planeten. Heute sind es mit rund 4 Milliarden Hektar noch etwa 30%, Tendenz abnehmend. Sie sind unverzichtbare Ökosysteme und Lebensräume vieler Tier- und Pflanzenarten und verbessern durch die Sauerstoffproduktion permanent die Zusammensetzung unserer Atmosphäre. Eine weitere Eigenschaft von großem Wert ist die Fähigkeit der Pflanzen, CO₂ zu absorbieren und zu binden. Die Menge des gebundenen Kohlenstoffs ist dabei unter anderem abhängig von der Baumart, seinem Standort und Alter. Eine Buche muss beispielsweise 80 Jahre lang wachsen, um 1 Tonne CO₂ umzusetzen und den enthaltenen Kohlenstoff zu speichern [3].

Die Berechnung von Bauholz mit einer negative CO₂-Bilanz in den Phasen A1-A3 basiert auf eben dieser Fähigkeit, den Kohlenstoff zu binden, der während des Wachstums von Bäumen aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Im Gegensatz zu Baumaterialien wie Beton oder Stahl, deren Herstellung erhebliche Mengen an CO₂ emittiert, entfernt Holz tatsächlich CO₂ aus der Atmosphäre und speichert Kohlenstoff langfristig. Doch auch am Ende der Lebensdauer eines Gebäudes kann das Holz wiederverwendet oder recycelt werden, wobei der Kohlenstoff weiterhin gebunden bleibt – bis das Holz als Biomasse energetisch genutzt wird, und ihn erneut als Kohlendioxid oder Kohlenmonoxid freisetzt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Substitutionseffekt: Holz kann andere Baustoffe ersetzen, deren Herstellung und Verarbeitung wesentlich CO₂-intensiver sind. Dadurch wird zusätzliches CO₂ eingespart. Die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse eines Gebäudes berücksichtigt die Gesamtemissionen von CO₂ über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, einschließlich der Rohstoffgewinnung, der Bauphase und des Abrisses sowie des Recyclings.

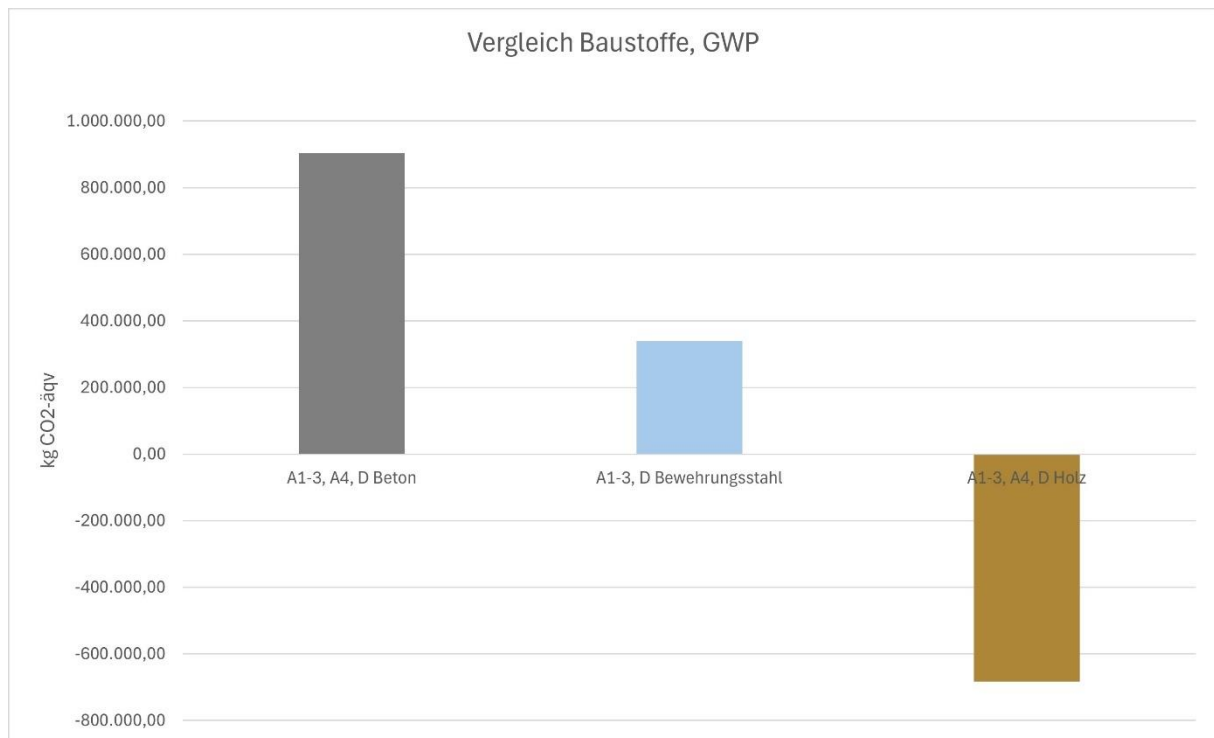


Abbildung 7 Größenordnung der verbauten Primärbaustoffe für das Gebäude (A1-A3)

Es gibt jedoch auch kritische Stimmen, die darauf hinweisen, dass die Verwendung von Bauholz zur „Schönrechnung“ der Ökobilanz von Neubauten führt. Auch ein nicht gefällter Baum speichert das CO₂ bis zu seiner energetischen Verwertung oder dem natürlichen Zerfall. Somit bedeutet die Umwandlung zum Bauholz lediglich eine Transformation des Materials aus der natürlichen Umgebung in das anthropogene Lager. In der CO₂-Bilanzierung könnte man daher den Einfluss auf das Bauvorhaben als CO₂-neutral (CO₂ = 0) betrachten, bzw. sogar noch den vorhandenen Aufbereitungswert für Sägen, Trocknung usw. zugeben. Ein neuer Baum an gleicher Stelle braucht Jahrzehnte, bis eine vergleichbare Menge CO₂ gebunden wird. Angesichts der aktuellen Klimakrise und der Notwendigkeit, CO₂-Emissionen sofort zu reduzieren und nicht erst in mehreren Jahrzehnten, wird daher die Kritik an der negativen CO₂-Bilanz von Bauholz verstärkt vorgetragen.

Nur wenn neue Bäume gepflanzt werden, um die gefällten zu ersetzen, bleibt die CO₂-Bilanz tatsächlich und vor allem über einen Betrachtungszeitraum von ca. 50 Jahren negativ. Ferner erfordert die Tatsache, dass die Menge des gebundenen CO₂ auch vom Alter und der Art des Baumes abhängt, eine durchdachte forstwirtschaftliche Nutzung, um positiv in die Bilanzierung miteinzufließen. Da ihre Dichte höher ist als eine solche von Nadelhölzern, vermögen Laubhölzer mehr CO₂ zu binden. Nicht nur die Resilienz von Wäldern erfordert folglich deren Durchmischung, sondern auch ein ungenutztes Potential an Kohlenstoffabscheidung. Nicht zu vernachlässigen ist dabei jedoch auch die erforderliche Anpassung der Holzverarbeitenden Industrie, deren Maschinen und Arbeitsprozesse auf die Bearbeitung deutlich weicheren Nadelholzes eingestellt sind. [4]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Holz als Baumaterial in der Summe tatsächlich eine negative CO₂-Bilanz aufweisen kann, indem Kohlenstoffe im Baumaterial eingelagert werden und so zur Reduzierung der Gesamt-CO₂-Emissionen beiträgt. Dies ist ein wichtiger

Schritt in Richtung nachhaltiger Bauweisen. Es ist jedoch essenziell, die Gesamtökobilanz eines Neubaus ganzheitlich und transparent zu betrachten, um sicherzustellen, dass die positiven Effekte nicht durch andere negative Auswirkungen aufgehoben werden.

1.2.1.1 Beton

1.2.1.1.1 Anwendung im Neubau -Eingebaute Menge

Dank der Kooperation von Seiten der Firma Garant aus Bad Salzuflen stehen für die Berechnungen der Ökobilanz und den Untersuchungen des ökologischen Transportaufwands reale Daten zur gelieferten Betonmenge zur Verfügung.

Die Massen des gelieferten Transportbetons auf Basis der Ökobetonrezeptur beläuft sich auf 2004,5m³, die des insbesondere für die Gründung des Gebäudes verwendeten Recyclingbetons auf 1290,75m³. Dies entspricht einem Verhältnis von ca. 6 zu 10. Insgesamt wurde damit überwiegend der sog. Ökobeton (vgl. Kapitel 1.3) im Gebäude verbaut.

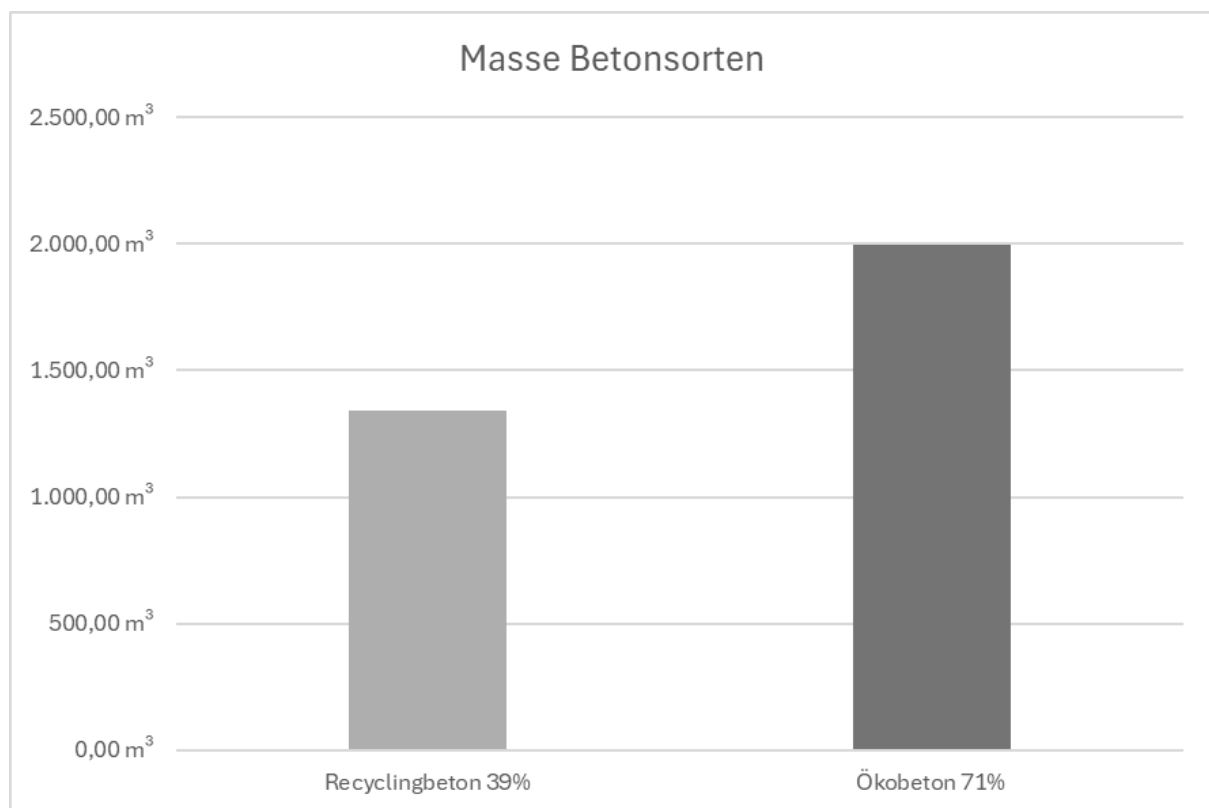


Abbildung 8 Verhältnis zwischen Recyclingbeton und Ökobeton

Die zeichnerisch und rechnerisch ermittelten Massen von Ökobeton innerhalb der Berechnungen der Ökobilanzierung entsprechen zu 99,7% der realen Masse, die Fa. Garant auf die Baustelle geliefert hat. Eine ähnlich hohe Übereinstimmung findet sich bei der berechneten Masse des Recyclingbetons der zu 96,2% der real angewendeten Menge entspricht.

1.2.1.1.2 EPDs

Da zu der verwendeten Ökobetonrezeptur nur bedingte EPD-Daten zur Verfügung stehen, wurde die EPD eines vergleichbaren Produkts gewählt. Dabei handelt es sich um den Ökobeton der Firma EcoPact, die für verschiedene Betonmischwerke und deren Standorte

jeweils eigene EPDs in der Oekobau.dat veröffentlicht hat. Da sich die EPDs der jeweiligen Standorte nur geringfügig voneinander unterscheiden ist für die Berechnungen folgende EPD gewählt worden:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=35a5da15-d24b-44a7-b816-80085e47ccd1&version=00.01.002&stock=OBD_2023_I&lang=de

Eine EPD für Recyclingbeton in allen gängigen Festigkeitsklassen existiert ebenfalls in der Datenbank der Oekobau.dat. Diese ist allgemein gehalten und fasst verschiedene Messwerte über Mittelwerte zusammen:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b38f2dac-fa08-4a9c-ae8d-017f6e2f169f&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de

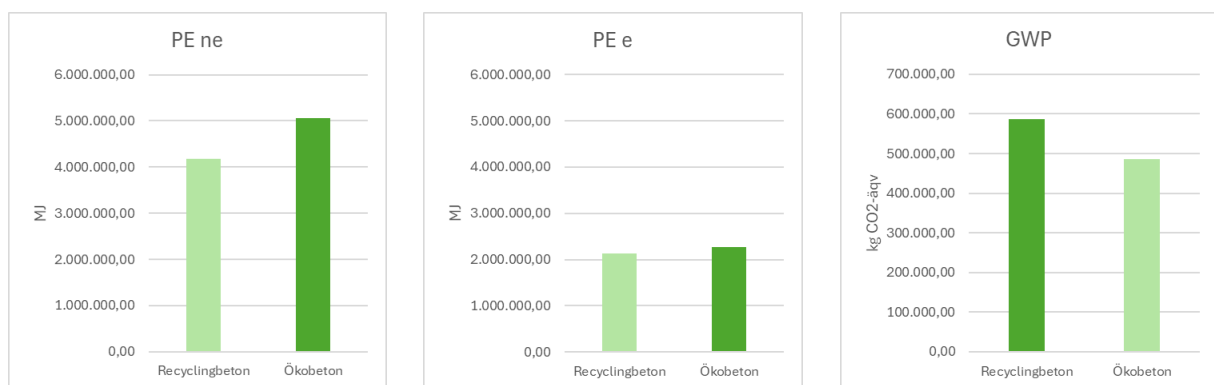


Abbildung 9 Ergebnisse der relevanten Umweltindikatoren für die eingesetzten Betonsorten in den Modulen A1-3, A4 und D

1.2.1.1.3 Ökobeton mit Cobiax-Hohlkörperdecken

Für den EPD-Datensatz der eingesetzten Cobiax-Hohlkörperdecken steht seitens des Herstellers keine gesonderte EPD zur Verfügung. Aus diesem Grund wird der Hauptbestandteil der Cobiaxdecken, Polypropylen über einen EPD Datensatz der Oekobau.dat als Referenz herangezogen.

(https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=94355965-8d24-4e78-a910-9f35b8ae1193&stock=OBD_2020_II&lang=de)

In Verbindung mit dem Ökobeton lassen sich über eine Gesamtfläche von ca. 82m² bis zu 35% Betonmasse einsparen, da die Cobiax-Hohlkörper die Deckenlasten mit abtragen und somit eine geringere Betondichte benötigt wird. Dennoch weisen die Ergebnisse der Hohlkörperdecke auf wenig Vorteile gegenüber einer Decke die ausschließlich durch Ökobeton trägt hin. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse einer Decke aus Ökobeton in Kombination mit den Cobiax-Hohlkörpern und reinem Ökobeton dargestellt. Es fällt auf, dass das Hinzufügen von Polypropylen einen höheren Energiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien (PE ne) verursacht, so dass die 35% Betonersparnis einen weniger geringeren Einfluss auf den Energiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien hat. Der Energiebedarf aus erneuerbaren Energien ist grundsätzlich geringer als der von reinem Ökobeton, was durch den Herstellungsprozess von Polypropylen begründet ist, bei dem vermutlich noch vermehrt auf fossile Energiequellen gesetzt wird. Einzig beim GWP emittiert

eine Ökobetondecke mit Cobiax-Hohlkörpern weniger CO₂ als eine Decke ausschließlich aus Ökobeton.



Abbildung 10 Vergleich des Ökobetones mit und ohne Hohlkörpereinsatz

1.2.1.1.4 Vergleich EPDs inkl. der Transportdaten

Im Vergleich zwischen Holz, Lehm und Bewehrungsstahl ist Beton der einzige Baustoff, bei dem das Modul A4 in den herangezogenen EPD-Datensätzen aufgeführt ist (vgl. 1.2.2).

Die für die Berechnung der Ökobilanz herangezogenen EPDs beinhalten für beide Betonarten jeweils Zahlenwerte für das Modul A4. Der GWP-Wert von Recyclingbeton liegt dabei bei 2,244 kg/CO₂-äqv. pro Referenzmenge von einem Kubikmeter und der von Ökobeton liegt bei 3,280 kg/CO₂-äqv.

Für die Berechnung der Ökobilanz der zwei angewendeten Betonarten wurden zwei Varianten gerechnet. Die erste Variante enthält die Werte für das Modul A4 aus den EPDs und die zweite Variante enthält berechnete Werte die den realen Transportweg von der Herstellung bis zur Baustelle abbilden. Die Entfernung zwischen dem Betonmischwerk von Garant bis zur Baustelle des FLM Detmold beträgt ca. 26,8 Straßenkilometer. Die für die Berechnung der Werte des Moduls A4 herangezogenen LKW-Werte (g CO₂/tkm) stammen ebenfalls aus einer EPD die auf der Oekobau.dat veröffentlicht wurde. Der Durchschnittswert für einen Tonnenkilometer liegt hier bei 106g CO₂ die emittiert werden.

Aus der Berechnung ergibt sich ein GWP-Wert von 2,667 kg/CO₂-äqv. Pro Kubikmeter als Referenzmenge. Dieser Wert liegt zwischen den beiden Werten aus den EPDs der jeweiligen Betonsorten. Das nachfolgende Diagramm verdeutlicht den daraus resultierenden geringen Einfluss auf den Gesamtwert GWP der zwei Betonsorten.

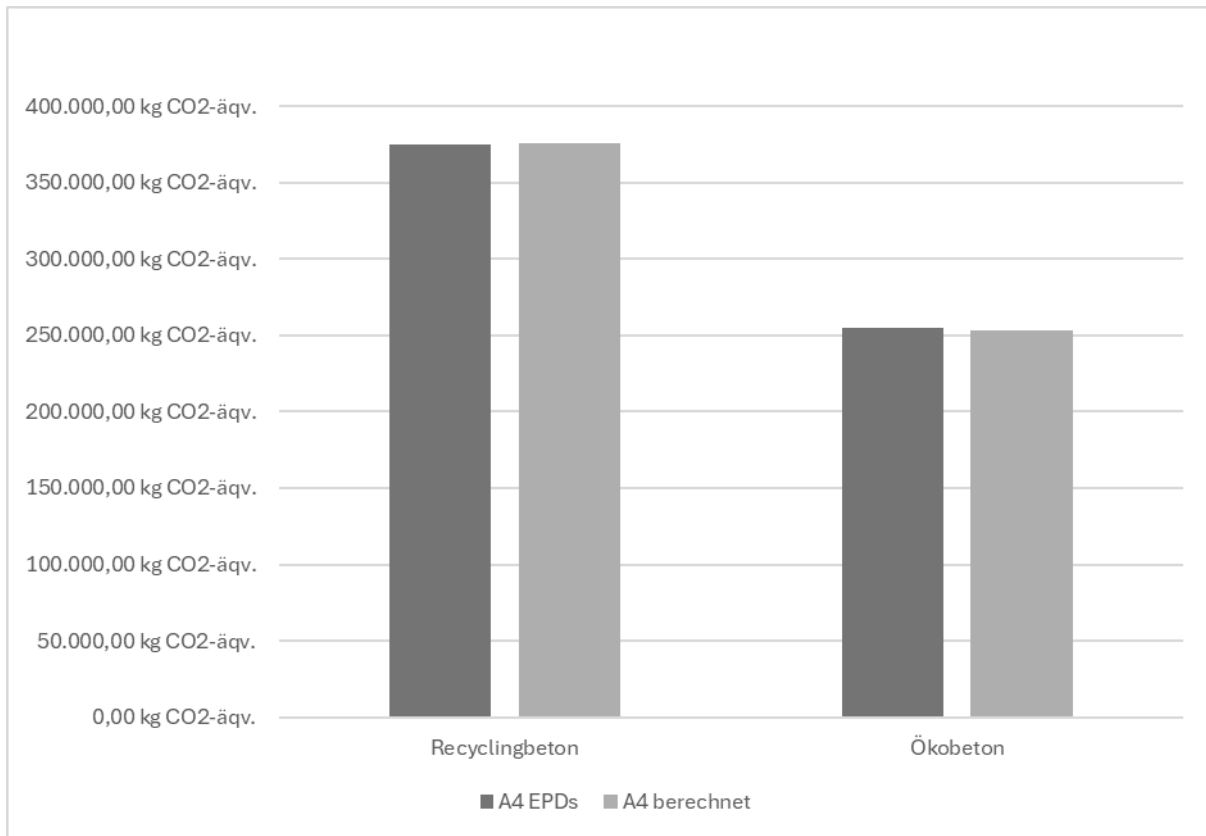


Abb. 4 Gegenüberstellung der jeweiligen A4-Werte beider Betonsorten

In der Betrachtung für den Beton fällt auf, dass die Ansätze der PDS den realen Transportweg relativ gut berücksichtigen: dies ist nicht überraschend, da es sich bei Beton ohnehin um einen regionalen Baustoff handelt, der nicht über weite Strecken transportiert werden kann.

1.2.1.1.5 Zwischenfazit Beton, Ökobeton

Im Hinblick auf die Gesamtbilanz des Betons in den Modulen A1-3 fällt zunächst auf das der Ökobeton bedingt durch einen 35% höheren Masseanteil im Gebäude auch einen höheren Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien (PE ne) als der Recyclingbeton hat. Dieser beträgt jedoch nur ca. 18,6% und entspricht damit nicht der prozentualen Mengendifferenz. Bei dem Primärenergiebedarf liegt der Unterschied bei ca. 6,5%. Bei der Betrachtung des Gesamtwerts GWP fällt auf, dass der Ökobeton in der Herstellung trotz höhere Masse im Gebäude ca. 17,3% weniger kg CO2-äqv. emittiert als der Recyclingbeton.

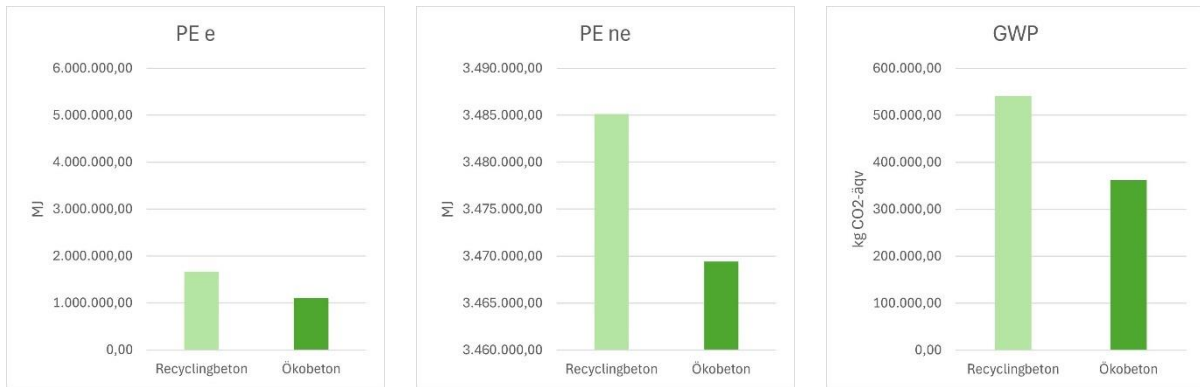


Abbildung 11 Gesamtbilanz Ökobeton und Recyclingbeton im Vergleich

1.2.1.2 Bewehrungsstahl

Laut dem Leistungsverzeichnis Rohbau sind im Gebäude insgesamt ca. 440 Tonnen Bewehrungsstahl verbaut. Die Berechnungen innerhalb der Ökobilanzierung decken sich mit einem Wert von ca. 448 Tonnen zu 98% mit diesem Ergebnis. Für die Berechnungen wird ein EPD-Datensatz speziell für Bewehrungsstahl im Allgemeinen herangezogen.

(https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de)

In diesem sind jedoch keine Daten zum Modul A4 enthalten. Einen realen Wert zu diesem Modul zu bestimmen, stellt sich als nahezu unmöglich heraus, da es eine Vielzahl unterschiedlicher Zulieferer des Bewehrungsstahls für die Baustelle gibt. Einige stammen nicht aus Deutschland, wie den Prüfsertifikaten zu entnehmen ist, die den Architekten vorliegen. Somit sind die Transportwege für Stahl teilweise sehr lang und die dabei freigesetzten Emissionen hoch. Den Informationen über Prüfsertifikate der einzelnen Stahlproduzenten ist zu entnehmen, dass der Stahl von über 17 Herstellern der Baustelle zugeliefert wird. Von diesen befinden sich 8 außerhalb Deutschlands, und der Transportweg ist unklar. Daher wird für die Berechnungen des Bewehrungsstahls kein A4-Wert bestimmt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Transport des Bewehrungsstahls von der Produktion bis zur Baustelle im Vergleich zu den anderen analysierten Baustoffen einen extrem hohen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen aufweist.

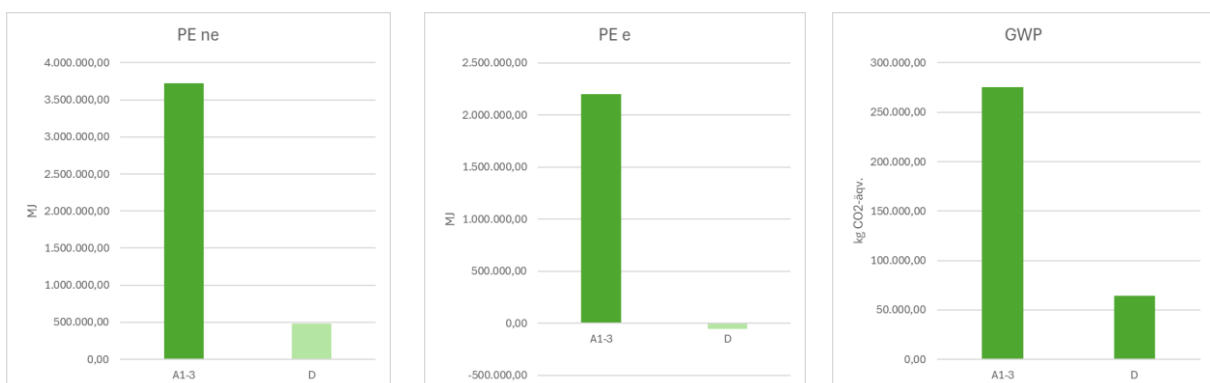


Abbildung 12 Gesamtbilanzdaten Bewehrungsstahl (ohne A4)

1.2.1.3 Stampflehm

1.2.1.3.1 Anwendung im Neubau

Eine Besonderheit des Gebäudes sind die großen tragenden Stampflehmwände zwischen Ausstellungsraum und Depot sowie dem Forum, die architektonisch das Foyer und die Ausstellung betonen. Insgesamt wurden ca. 762 m³ Lehm geliefert, was ein Gewicht von 1.524t ergibt. Abbildung 13 zeigt die Verortung im Gebäude.

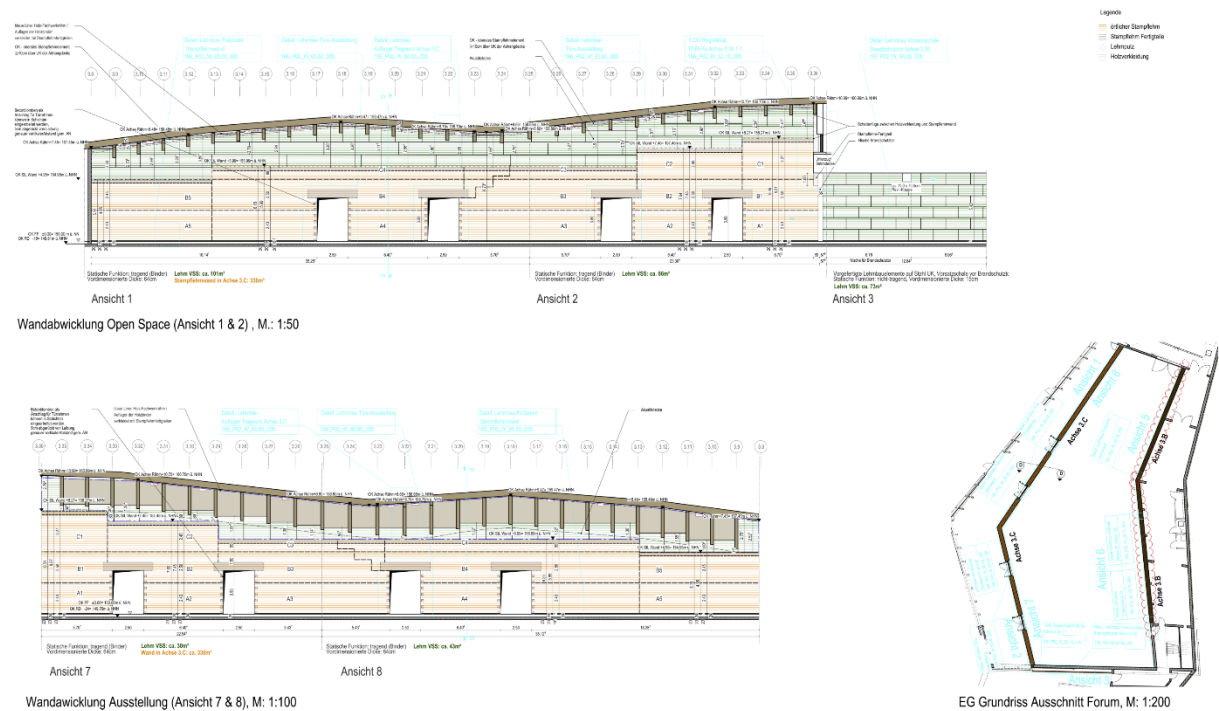


Abbildung 13 Hauptteil der verbauten Lehmbauelemente im Ausstellungsraum [acms]

Der im Neubau des FLM Detmold verbaute Stampflehm stammt von der ebenfalls in Detmold ansässigen Firma Conluto. Der für die Herstellung verwendete Lehm kann dabei jedoch aus unterschiedlichen Quellen stammen. Dies variiert bei jedem Bauvorhaben, da der Lehm überwiegend aus Baugruben als sekundärer Baustoff gewonnen und auf dem Firmengelände von Conluto weiterverarbeitet wird. Laut bisherigem Kenntnisstand, stammt der im Neubau des Freilichtmuseums verbaute Lehm aus regionalen Quellen, überwiegend vom Neubau eines Firmengebäudes für Phönix Contact in Blomberg (tel. Auskunft Fa. Conluto). Im vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass diese Transporte von der Lehmgrube bis zur Fa. Conluto über A2 ausreichend berücksichtigt sind.

1.2.1.3.2 Inhalte EPD inkl. der Transportdaten

Der Transportweg des Lehms vom Firmengelände zur Baustelle beträgt nur etwa 13,7 km. Multipliziert mit der Entfernung zwischen dem Vertriebsort und der Baustelle des Neubaus ergibt das einen Wert von 20.878 Tonnenkilometer. Laut der verwendeten EPD aus der Oekobau.dat, emittiert ein LKW durchschnittlich 106g CO₂ pro Tonnenkilometer. Multipliziert mit den zuvor berechneten gefahrenen Tonnenkilometern ergibt sich ein Wert von 2,24 t CO₂.



Abb. 5 Ergebnisse der relevanten Umweltindikatoren für Stampflehm

Da Lehm nicht in seiner Grundsubstanz hergestellt werden muss, da es sich um einen natürlich vorkommenden Rohstoff handelt, ist der Herstellungsaufwand im Vergleich zu Holz und Beton sehr gering. Lediglich die Aufbereitung und der Abtransport aus Gruben und anderen Abbaustellen erfordert einen entsprechenden Energieverbrauch. Anhand der nachfolgenden Diagramme wird deutlich wie groß sich hingegen der Einfluss der Transportemissionen auf die Gesamtbilanz des Lehms auswirkt. Rund ein Drittel der CO₂ Emissionen sind hier auf den Transport des Materiales zur Baustelle zurückzuführen. Durch den kürzeren Transportweg ist der A4 Wert GWP bei etwa 13% des Wertes des angelieferten Holzes.

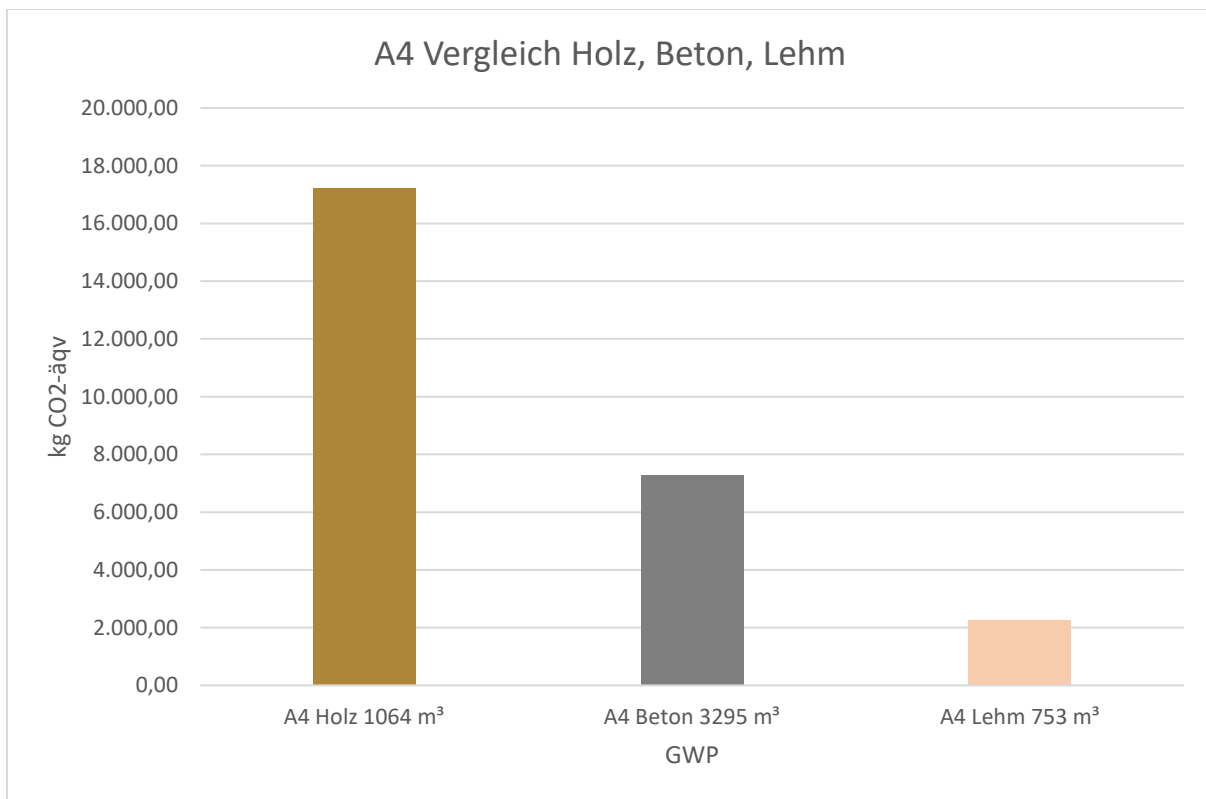


Abbildung 14 Vergleich der CO₂ Emissionen aufgrund von Transporten (A4; individuell berechnet)

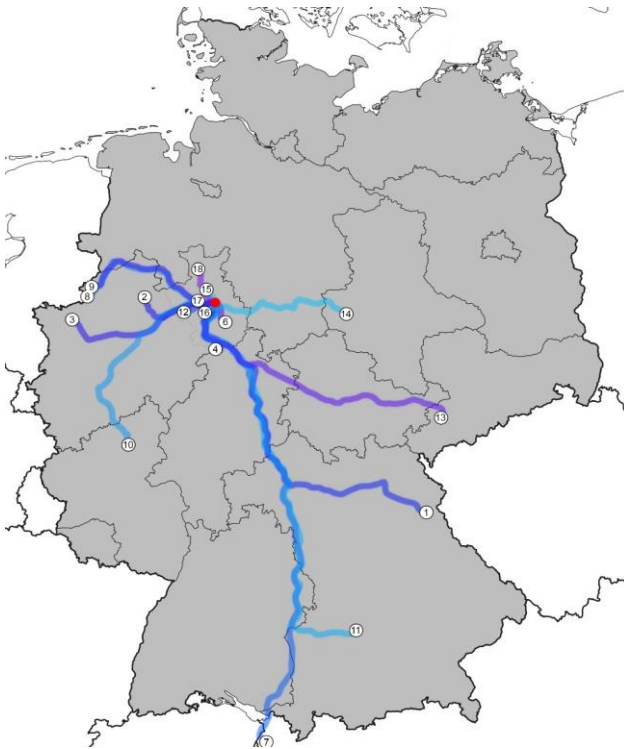
1.2.1.3.3 Zwischenfazit Stampflehmwand

Das in Abbildung 14 dargestellte Diagramm verdeutlicht die ökologische Qualität des Baustoffs Lehm. Da Lehm in natürlicher Form und teilweise als Nebenprodukt bei dem Ausheben von Baugruben gewonnen wird ist der Energieverbrauch für die Bereitstellung entsprechend niedrig. Die kritische Betrachtung des Transportes beinhaltet daher ein im Verhältnis größeres Potenzial für negative Umweltauswirkungen als bei Baustoffen wie Beton, dessen Herstellung im Verhältnis zum Transport wesentlich mehr CO₂ emittiert und Energie verbraucht. Doch wie in Abbildung 14 zu sehen sind auch die Transport-Emissionen im Vergleich zu Holz und Beton gering, trotz einer ähnlich hohen transportierten Masse im Vergleich zu Holz. Die Transportdistanz ist hierbei entscheidend und so lange der Lehm aus regionalem Ursprung zur Baustelle geliefert wird fällt die Gesamtökobilanz sehr positiv aus.

1.2.2 Bedeutung der Regionalität, Vergleichende Betrachtung der Transportwege (Modul A4 in den EPDs)

Bei der Betrachtung der Ökobilanzen von Gebäuden wird der Transport von Baustoffen im gesamten Bauprozess über die Module A2, A4 und C2 abgebildet. Nach Abschluss der Berechnungen lässt sich somit eine Aussage dazu treffen inwieweit diese Module die Ökobilanz des Gebäudes beeinflussen. Dabei wurde der menschliche Faktor, genauer gesagt, der Personaltransport von den Firmenstandorten der ausführenden Gewerke zur Baustelle in Detmold bisher nie berücksichtigt. Das folgende Beispiel, soll näherungsweise den Personentransport während des Bauvorhabens darstellen und einen Vergleich zu dem Transport von Baustoffen zur Baustelle ziehen. Die Grafik zeigt die deutschen Staatsgrenzen und schneidet umliegende Länder an. Insgesamt sind in der Projektbeteiligten Liste auf dem Projektserver 18 ausführende Gewerke aufgelistet, eines davon stammt nicht aus Deutschland.

Aufwand Personentransporte



- 01: 495km Harald Gollwitzer GmbH
- 02: 105km BM Baulogistik + Service GmbH
- 03: 201km Elektrotechnik Eimers GmbH
- 04: 84km Baugesellschaft PRIOR mbH
- 05: 8 km Büro für GeoInformatik Dipl.-Ing. Bernd Porath (nicht auf Karte)
- 06: 33km Elektro Beckhoff GmbH
- 07: 658km Lehm Ton Erde Baukunst GmbH
- 08: 191km Teupe & Söhne Gerüstbau GmbH
- 09: 184km Terhalle Holzbau GmbH (Mail an Herr Terhalle geschrieben)
- 10: 282km Akin Metallbau GmbH & Co KG
- 11: 564km ZÜBLIN Timber GmbH
- 12: 40km Hermann Kathöfer GmbH
- 13: 379km Greenty GmbH
- 14: 188km Jansen Tore GmbH & Co. KG
- 15: 14,4km GaLaBau Lippe GmbH Frank Schröder
- 16: 24,1km Hubert Niewels GmbH
- 17: 22km Kieback&Peter GmbH & Co. KG
- 18: 51km Acotherm GmbH

Abb. 6 Ursprung/Sitz der ausführenden Gewerke, Neubau FLM Detmold

Der VCD empfiehlt die Faustformel „110–120–140“:

CO ₂ -Emissionen und Kraftstoffverbrauch			
Beispiele	Grenzwert (vom VCD)	Benzin (1 l = 2,37 kg CO ₂)	Diesel (1 l = 2,65 kg CO ₂)
Kleinwagen	110 g CO ₂ /km	4,6 l/100 km	4,2 l/100 km
Kompaktklasse	120 g CO ₂ /km	5,1 l/100 km	4,5 l/100 km
Familienauto	140 g CO ₂ /km	5,9 l/100 km	5,3 l/100 km

Abb. 7 PKW Kraftstoffverbrauch [15]

Die Entfernung bzw. Kilometer aller ausführenden Gewerke zur Baustelle belaufen sich auf insgesamt 3.472,50km. Für die emittierten CO₂-Emissionen des PKWs wird der Wert einer Kompakt-Klasse von 120g CO₂/km angesetzt. Die Rechnung zur Ermittlung der dabei auf die Kilometerzahl emittierten CO₂-Emissionen lautet wie folgt: 3.472,50km x 0,120kg CO₂/km = 416,2 kgCO₂ werden ca. von allen beteiligten ausführenden Gewerken für eine PKW-Fahrt zwischen Unternehmenssitz und Baustelle des Neubaus emittiert.

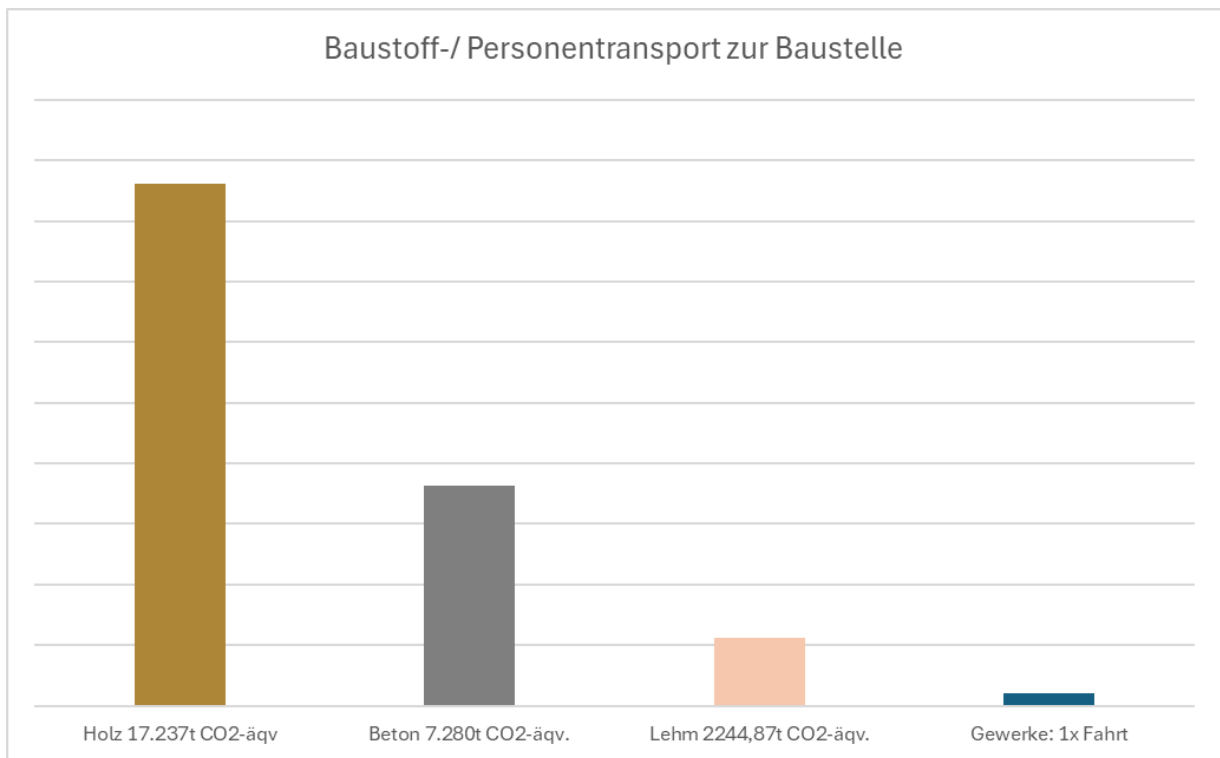
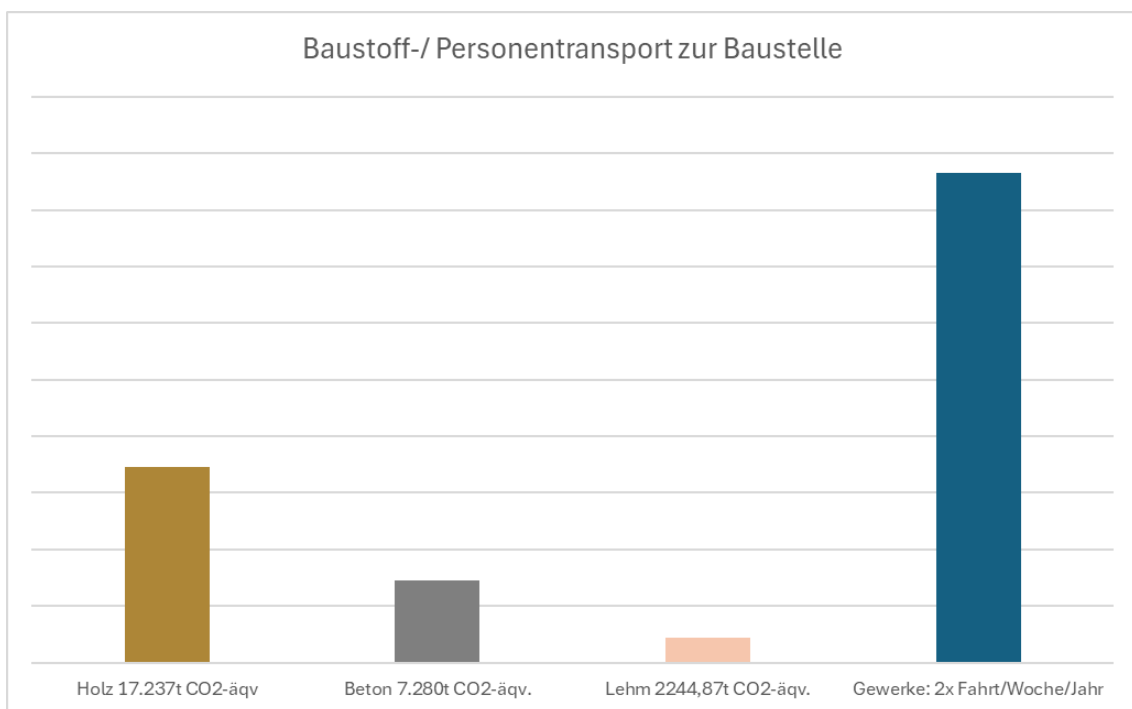


Abbildung 15 Vergleich der Baustofftransporte mit einer „Gewerkefahrt“

Das Schaubild verdeutlicht das bereits eine Fahrt also beispielsweise ein Hinweg zur Baustelle im Vergleich zu den drei Referenzbaustoffen Holz, Beton und Lehm einen nicht unerheblichen CO2-Wert emittiert. Angenommen alle Gewerke schicken einmal die Woche, über ein Jahr hinweg, einen Mitarbeiter von deren Firmensitz aus zur Baustelle nach Detmold ergibt sich folgende Rechnung:

$$416,2\text{kg CO}_2\text{-äqv.} * 2 \text{ (Hin- u. Rückweg)} * 52 \text{ Wochen} = 43.284 \text{ kg CO}_2\text{-äqv.}$$



Umgerechnet wird der A4-Wert von Holz (Tragwerk) von 42 Fahrten eines Mitarbeiters aller 18 Gewerke abgebildet. Beim Beton sind es ca. 18 Fahrten, und beim Lehm 5.

Diese Rechnung ist beispielhaft und kann nicht anhand von realen Personentransport-Daten bestätigt werden. Einige der aufgelisteten Gewerke werden nicht über ein Jahr hinweg an der Baustelle beteiligt sein. Außerdem werden eventuell Nachunternehmer engagiert die eine vergleichsweise geringere Anreisestrecke benötigen. Dennoch sind wohlmöglich Arbeiter aus dem Ausland beteiligt die mehrfach eine noch höhere Kilometerzahl zur Baustelle benötigen als über die Entfernung der Gewerke abgebildet ist und es ist auch möglich, dass manche Gewerke mit mehreren Fahrzeugen mehrfach die Woche anreisen.

Eine Empfehlung für zukünftige Bauprojekte lautet, die genaue Betrachtung der Personaltransporte und die dabei freigesetzten CO₂-Emissionen in die Ökobilanzierung bzw. Zertifizierung der DGNB und QNG mit aufzunehmen. Es ist absehbar, dass der Personaltransport ähnlich viel oder sogar mehr CO₂ emittiert als der Transport im Modul A4 aller eingesetzten Baustoffe zusammen.

1.2.2.1 Baustoffe und Lieferwege

Die Recherche zu den EPDs der einzelnen Baustoffe hat ergeben, dass nur bei 8 von 27 untersuchten Baustoffen das Modul A4 mit Werten versehen ist. Das Modul A4 wird in EPDs von Baustoffen in der Oekobau.dat und allgemein vermutlich so selten abgebildet, weil die hohe Variabilität der Transportwege, individuelle Projektanforderungen, die Grenzen pauschaler Annahmen, der Fokus auf Produktionsprozesse, die Komplexität der Datenerhebung und normative Vorgaben dies erschweren. Dennoch könnten durch erweiterte Datenerhebung, standardisierte Methoden und flexible Ansätze genauere und umfassendere Darstellungen der Transportemissionen in EPDs erreicht werden.

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht, dass die Datenerhebung zum Modul A4 der Lebenszyklusanalyse sehr lückenhaft in den EPDs der Oekobau.dat erfolgt. Für die im Fokus dieser Arbeit stehenden Primärbaustoffe des Gebäudes, Holz, Lehm und Beton konnten die Werte anhand von realen Daten ermittelt werden. Hierfür wurden Massen aus Lieferscheinen und Angaben zur Herkunft der gelieferten Baustoffe seitens der ausführenden Gewerke und Baustoffzulieferer ausgewertet. Daraufhin wurden die Straßenkilometer der jeweiligen Ursprungsorte ermittelt als Grundlage für die Berechnung der CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer. Für das emittierte CO₂-Äquivalent eines LKWs pro Tonne und Kilometer wurde eine entsprechende EPD von der Oekobau.dat verwendet.

#	EPD Titel in den Berechnungen	A1-3	A4	C4	D
1	Recycling-Beton C30/37		ermittelt!		
2	Ökobeton C30/37		ermittelt!		
3	Recycling-Beton C25/30		ermittelt!		
4	Ökobeton C25/30		ermittelt!		
5	Bewehrungsstahl				
6	Schaumglasschotter				
7	PE Noppenfolie				
8	Zementestrich				
9	Ausgleichsschicht, Holzspanschüttung mit Zementummantelung				
10	Holzfaserdämmplatte				
11	Polypropylen				
12	Schaumglasdämmung				
13	Bitumenbahn				
14	Steinwolle Flachdämmplatte				
15	Photovoltaikanlage				
16	Mineralwolle-Dämmstoff im niedrigen Rohdichtebereich				
17	Oriented Strand Board (OSB)		ermittelt!		
18	Baustroh				
19	Konstruktionsvollholz (Unterkonstruktion)		ermittelt!		
20	DWD-600				
21	Unterspannbahn PP				
22	FPD-Abdichtung auf Basis PU oder silanmodifiziertem Polymer, Gruppe 3				
23	Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS)				
24	Mehrscheibenisolierverglas 2-fach				
25	Stampflehmwand		ermittelt!		
26	Balkenschichtholz		ermittelt!		
27	Brettschichtholz - Standardformen		ermittelt!		

Abbildung 17 Tabelle zur Übersicht über die vorhandenen und nicht vorhandenen Module in den EPDs

Die vorstehende Übersicht listet alle verwendeten EPDs zu den verwendeten Baustoffen anhand der Regeldetails der Ausführungsplanung auf. Die insgesamt 27 verwendeten EPDs spiegeln die Schichtaufbauten der Bauteile im Bodenbereich und Decken, Außenwänden, Fassade, Dach etc. wider.

1.2.2.1.1 Fazit Regionalität

Bei einer genaueren und reflektierten Betrachtung wie es bei den Transportvorgängen von Bauholz wird deutlich, dass die Transportdistanzen zu Modul A4 (Transport zur Baustelle) nicht durch allgemeingültige Datenbanken festgelegt werden können. Pauschale Ansätze, wie aktuell in einigen Datensätzen vorhanden, machen zwar Gebäude gleicher Nutzung vergleichbar, verfälschen jedoch das Bild da sie im Ergebnis um bis zu 24 % von einer speziellen Betrachtung abweichen.

Tatsächlich müssten also die Entfernungen zwischen dem Hersteller und der Baustelle individuell für jedes Bauvorhaben und Material berechnet werden, um präzise und fundierte Entscheidungen treffen zu können. Dieses Vorgehen ist erforderlich, da pauschale Annahmen den spezifischen Bedingungen jedes Bauprojekts nicht gerecht werden und somit die tatsächlichen Umweltwirkungen nur ungenau widerspiegeln.

Dies ist umso wichtiger für spezialisierte Hersteller ökologischer Materialien, die häufig einen starken Fokus auf Nachhaltigkeit legen – da bei Ihnen der prozentuale/ absolute Anteil an der Ökobilanz überproportional wichtig werden kann (vgl. Abbildung 18).

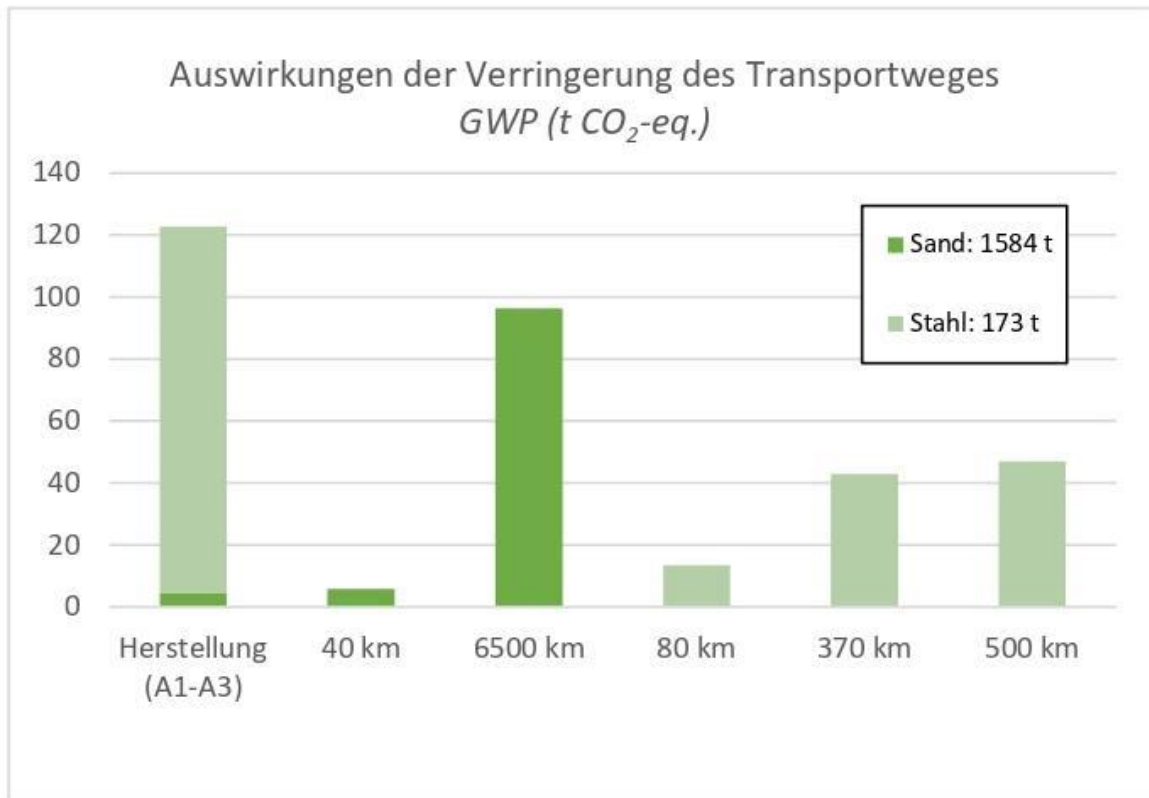


Abbildung 18 Auswirkungen des Transportes bei herstellungsexensiven (Sand) und -intensiven (Stahl) Baumaterialien

Es wird sichtbar, dass beim Stahl der Herstellungsaufwand sehr groß ist, aber Entfernungen bis 500 Kilometer deutlich unter diesem Wert bleiben. Beim Sand zeigen sich die Verhältnisse genau invers - der Herstellungsaufwand ist niedrig und ab einer Entfernung von circa 30 Kilometer überschreitet der Transportaufwand den Herstellungsaufwand. Dies ist auf viele Baustoffe mit einem niedrigen Herstellungsaufwand (Holz, Lehm) zutreffend.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Einfluss der Transportvorgänge nicht zu vernachlässigen ist, und zudem bisher in den Datensätzen der Ökobilanzen auch tatsächlich heterogen einbezogen wird.

Ob und inwieweit hier Änderungsbedarf besteht, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Solange alle Beteiligten mit den gleichen Randbedingungen kalkulieren, sind die Gebäude untereinander vergleichbar und Transportwege vielleicht tatsächlich nachgeordnet. Hinzu kommt das heute im Rahmen von Zertifizierungen oder Ökobilanzierung schon alle Eingangsparameter bekannt sein sollen, wenn das Gebäude teilweise noch im Entwurfsstadium oder in der Grundlagenermittlung ist, da zu diesem Zeitpunkt bereits die Ziele und Finanzierungen fixiert werden sollen.

Dem steht auf der anderen Seite gegenüber, dass sich durch den Transport die ökologische Beurteilung eines Materials verändern kann - dass zum Beispiel ein weniger ökologisches Material durch Regionalität und kurze Transportwege sinnvoller sein kann als die ökologischere Alternative mit einem langen Transportweg. Dieses Dilemma ist nur durch individuelle Betrachtung lösbar.

1.2.3 Fazit Ökobilanz

Diese Betrachtungen zeigen die Komplexität und die Herausforderungen bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Baumaterialien. Es wird deutlich, dass eine pauschale Bewertung oft nicht ausreicht, um die tatsächlichen Umweltwirkungen vollständig zu erfassen. Eine genaue und individuelle Analyse ist daher notwendig, um fundierte und nachhaltige Entscheidungen im Bauwesen zu treffen. Solche Analysen sollten sowohl die Herstellung als auch den Transport und die End-of-Life-Phase der Materialien berücksichtigen, um eine umfassende und realistische ökologische Bewertung zu ermöglichen.

Ein Vergleich der Gesamtbilanz der Ist-Zustand Version mit den Ergebnissen der Gesamtbilanz der konventionellen Version des Gebäudes und der Forschungsversion aus dem Abschlussbericht Stufe I erscheint wenig sinnvoll. Denn die noch während der Planungsphase des Gebäudes erhobenen Daten sind in der heutigen Zeit unvollständig und fehlerhaft. Im vorherigen Abschlussbericht fällt die Ökobilanz der Forschungsversion im Bereich GWP negativ aus. Die für die Berechnungen angesetzte Menge Holz ergab, dass das Gebäude theoretisch mehr CO₂ binden würde als zu emittieren. Die Ergebnisse der Ökobilanz des Ist-Zustand sind fallen deutlich anders aus. Der GWP-Wert von ca 362 t/CO₂-äqv. ist höher und vor allem positiv im Vergleich zur Forschungsversion. Das lässt sich durch die signifikant höhere Menge an eingesetzten Beton erklären, dessen genaue Massen zum damaligen Planstand noch nicht bekannt waren. Die Menge an regenerativen Rohstoffen wie Holz und Baustroh reicht nun nicht länger aus, um den GWP-Wert negativ werden zu lassen.

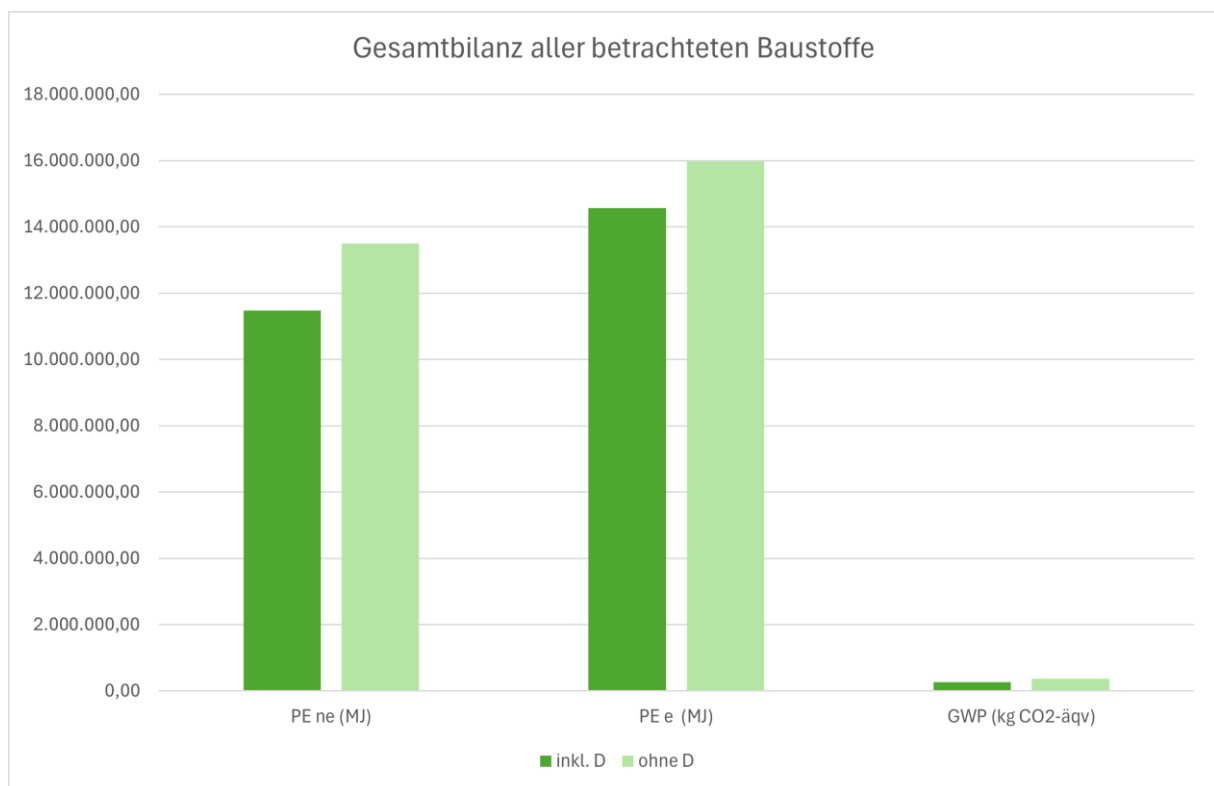


Abb. 8 Ergebnisse der relevanten Umweltindikatoren für die gesamte Ökobilanz des Gebäudes

Vergleichende Betrachtung der Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse für das Freilichtmuseum Detmold ist ebenso wie eine komplette und detaillierte Ökobilanz bereits durch das Büro MNP im Rahmen der DGNB Zertifizierung durchgeführt worden. Es macht aus Sicht der Verfasser wenig Sinn, hier eine neue LCA aufzustellen und gegebenenfalls strittige Positionen zu diskutieren. Sinnvoller erscheint es dagegen, die Ergebnisse der Zertifizierung und der eigenen Ökobilanz zu vergleichen und in einen größeren Kontext einzuordnen.

Die Ökobilanz der DGNB Auditoren liefert ein Ergebnis von 648 t CO₂eq als Herstellungsaufwand [1]. Hierin enthalten sind nicht nur alle Bauteile, sondern auch die Anlagentechnik. Dieser Wert liegt 45 Prozent über den von uns errechneten, was aufgrund des größeren Bilanzierungsrahmens nicht verwundert.

Die Nutzungsdaten werden allgemein auf der Grundlage der GEG Berechnung nach DIN V 18 599 angesetzt [2]. Da das Gebäude mit einer Wärmepumpe betrieben wird, gibt es in dem ganzen Gebäude eigentlich nur den einen Energieträger Strom. Kempen- Krause Ingenieure errechnen in ihrem Energieausweis eine Endenergie von 80.704 Kilowattstunden pro Jahr. Abbildung 1 zeigt die Verteilung dieses Wertes über die Verbrauchseinheiten [16].

Energieträger	Prozessbereich	Zonen	Endenergie kWh/a	f_P	$f_{Hs/Hi}$	Q _P kWh/a
eco-Strom	Heizwärme	*	90.283	1,80	1,00	162.510
Strom-Mix	Warmwasser	4/	66.632	1,80	1,00	119.937
Strom-Mix	Beleuchtung	**	19.130	1,80	1,00	34.433
Strom-Mix	Hilfsenergie		57.976	1,80	1,00	104.357
Strom-Mix	Stromgutschrift		-153.317	1,80	1,00	-275.971
Σ [kWh/Jahr]			80.704			145.266

Abbildung 19 Auszug aus dem Wärmeschutznachweis von Kempen-Krause Ing.; hier Aufteilung des Endenergiebedarfes nach Energieträgern [16]

Nach der vorliegenden Berechnung entspricht dies eine jährlichen CO₂ Emission von 45,2 Tonnen CO₂ pro Jahr bei einem Emissionsfaktor von 560 g CO₂ pro Kilowattstunde. Dieser Emissionsfaktor ist relativ hoch, liegt doch die CO₂ Emission je Kilowattstunde nach den Angaben des Umweltamtes bei 498 g/kWh inkl. der Vorketten, die seit 2020 berücksichtigt werden sollten, bzw. nach den Berechnungsvorgaben der BAFA bei 434 kWh/m²a (wahrscheinlich ohne Vorketten) [3]. Unter der Voraussetzung, dass den DGNB Auditoren bei MNP der gleiche Endenergiebedarf vorlag, hätten diese übrigens einen Emissionsfaktor von ca. 540 g/kWh angesetzt. Die Bandbreite möglicher Ergebnisse schwankt damit zwischen 35.026 kg/a und 45.194 kg/a was immerhin einer Abweichung von mehr als 20% entspricht.

Fossile, nukleare und erneuerbare Energieträger

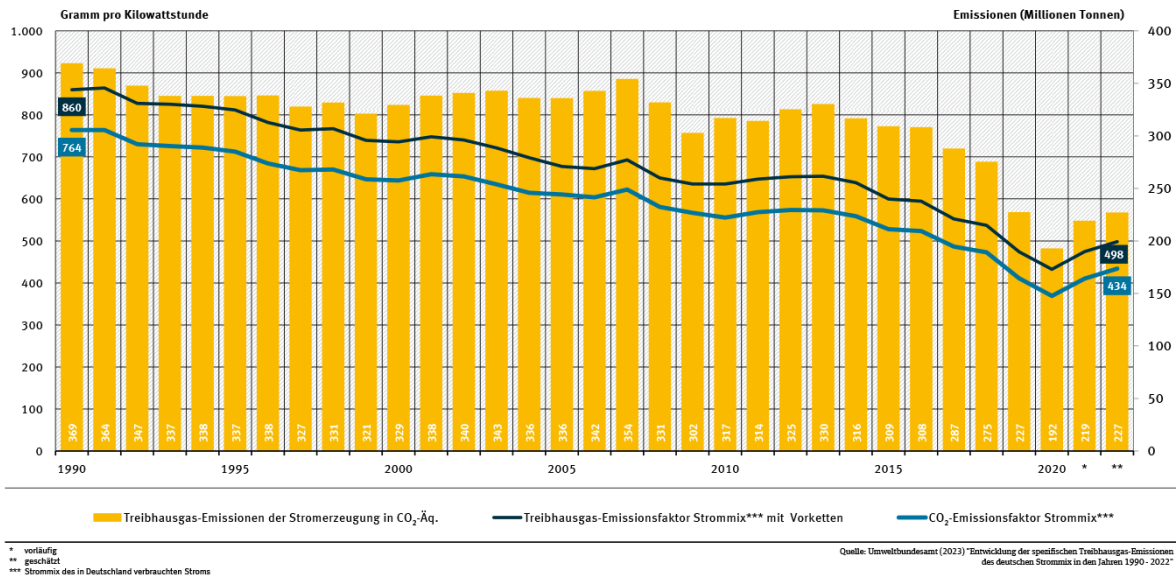


Abbildung 20

Über einen Bilanzzeitraum von 50 Jahren kommen so bei linearer Fortschreibung insgesamt 1750 t CO₂ für das Gebäude zusammen; bzw. ca. 7 kg/m²a bezogen auf eine NGF von 4947 m². Gleichzeitig produziert die PV Anlage insgesamt mehr Strom als für den Gebäudebetrieb nach DIN 18599 benötigt wird – weswegen insgesamt sogar eine CO₂ Gutschrift möglich ist [15].

Kosten

Die Baukosten des Museums belaufen sich nach den Unterlagen der DGNB Auditoren auf

- HK 300 Baukonstruktion 18.595.817,18 €
- HK 400 Technische Anlagen 6.384.351,53 €

in Summe also fast 25 Mio. Euro. Hierbei fällt das Verhältnis der Kostengruppen zueinander auf: mit nur 25% Herstellungskosten für die Technische Gebäudeausrüstung ist dies ein extrem niedriger Wert für ein Museum.

Auffällig ist zudem der negative Ansatz der Nutzungskosten für Energie. MNP begründet dies auf Nachfrage mit der o.g. Überproduktion der PV-Anlage, die nach diesem Modell (nur Strom nach DIN 18599!) den größten Teil ihres Ertrages ins öffentliche Netz einspeist – und so für eine jährliche Gutschrift für Energieexporte sorgt. Es bleibt abzuwarten, ob dies den realen Verhältnissen entspricht.

1.3 Arbeitspaket 5.2: Ökobeton

1.3.1 CO₂ reduzierte Betone /Möglichkeiten zur Herstellung

Auf der Grundlage der Untersuchungen der ersten Stufe des Projektes wurde schnell deutlich, dass auf den Einsatz von bewehrten Betonbauteilen nicht verzichtet werden kann. Gleichzeitig wiesen die Ökobilanz-Daten darauf hin, dass die Anteile des Betones im Vergleich zu den anderen vorgeschlagenen Baustoffen (Holz, Lehm, Stroh) einen großen Einfluss auf das

Ergebnis der ökologischen Bilanzen haben. Entsprechend wurden im Rahmen des Forschungsprojektes von der Hochschule Bochum unter dem Arbeitstitel „Ökobeton“ Vorschläge zur Reduktion der Klimaschädlichkeit von Betonen gemacht wie zum Beispiel die Verbesserung der Komponenten oder die generelle Substitution von Beton (z.B. durch Kassettendecken o.ä. Maßnahmen).

Die Überlegungen, Treibhausgasemissionen im Betonbau einzusparen, sind hierbei grundsätzlich nicht neu. Es existieren bereits diverse Ansätze, die dieses Ziel anstreben. Ein Überblick über den Stand der Forschung zeigt, dass die verschiedenen Ansätze in Kategorien eingeordnet werden können. Diese Kategorien ergeben sich aus der Methode, mit welcher das Treibhausgaspotenzial reduziert werden soll. So lassen sich die folgenden Kategorien aufstellen:

- **Zementzusatzstoffe:** weniger klimaschädliche Feinstoffe, wie Gesteinsmehle, ergänzen die Wirkung des Bindemittels Zement und können diesen teilweise ersetzen.
- **Massereduktion (Konstruktiv):** Dieser Ansatz behandelt den Aspekt der Suffizienz. Auch bei Standardbeton kann auf konstruktive Weise die Menge an Beton im Bau reduziert und dementsprechend Treibhausgasemissionen eingespart werden. Dies geschieht beispielsweise durch Hohlkörper-Einsätze in Betondeckenbauteilen.
- **Einsatz von Bakterien:** Diese Ansätze beschäftigen sich mit dem Einsatz von verschiedenen Bakterienarten, die beispielsweise Risse im Beton während der Nutzungsphase „reparieren“ oder einen betonähnlichen Baustoff produzieren können.
- **Einsatz pflanzlicher Stoffe:** Verschiedene pflanzliche Materialien wie Cassavaschalen können zu einem betonartigen Baustoff ohne Portlandzement verarbeitet werden.
- **CO₂-Upcycling:** Kohlenstoffdioxid wird als Ausgangsstoff für neue Betonbauteile wieder in den Kreislauf zurückgeführt. Dies kann auch über eine gezielte Karbonatisierung an Betongranulat (für Recyclingbeton) erfolgen, oder als Carbon Capture and Utilization Anwendung.

Ein Großteil dieser Ansätze befindet sich zum aktuellen Zeitpunkt noch in einem Forschungszustand und kann noch nicht für Bauprojekte eingesetzt werden. Ein häufiges Problem liegt in der Dauerhaftigkeit des Materials. Weitere Probleme ergeben sich aus der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe sowie dem – im Vergleich zu Standardbeton oft deutlich höheren – Herstellungsaufwand. Aufgrund fehlender Marktdurchdringung ist die Wirtschaftlichkeit ebenfalls oft noch nicht gegeben. Diese Übersicht bietet jedoch einen Ausblick auf die Möglichkeiten, die in zukünftigen Projekten zu Themen des nachhaltigen Betonbaus an Relevanz gewinnen können.

Da das neue Foyer Gebäude des FLM Detmold als Leuchtturm geplant werden sollte, wurden Maßnahmen aus mehreren Kategorien kombiniert, um optimale Ergebnisse zu erzielen:

In Absprache mit der Bauherrenschaft, den zukünftigen Nutzern, der fördernden DBU und den planenden Architekten wurden die Ansätze der alternativen Bindemittel, der konstruktiven Massenreduktion und der Zementzusatzstoffe gewählt, um das gesetzte Ziel maximal minimierter GWP- Emissionen zu erreichen. Zusätzlich wurden auch Zuschläge aus recykliertem Beton eingesetzt. Aufgrund des im Vergleich zur Kiesgewinnung aufwendigeren Herstellungsverfahrens reduziert dies zwar nicht die Treibhaus-Gas- Emissionen, trägt aber seinerseits zur Ressourcenschonung bei, indem keine natürlichen Kiese oder Sande abgebaut werden müssen. Im Folgenden werden die einzelnen Maßnahmen kurz vorgestellt:

1.3.1.1 Zementzusatzstoffe

Ein wesentlicher Faktor für die CO₂-Emission eines Zementes ist der Anteil der Klinkerfraktion in seiner Rezeptur. Während in einem CEM I nach DIN EN 197-1 noch 95-100% an Portlandzementklinker enthalten sind, muss ein CEM II „nur“ noch mehr als 65% enthalten, ein CEM III max. 65%. Entsprechend fallen die Ökobilanzdaten dieser drei Zementarten aus (vgl. Abbildung 21), da die eingesetzten Bindemittelstoffe wie Flugasche oder Hüttensande einen niedrigeren Einfluss auf die Bilanzdaten haben.

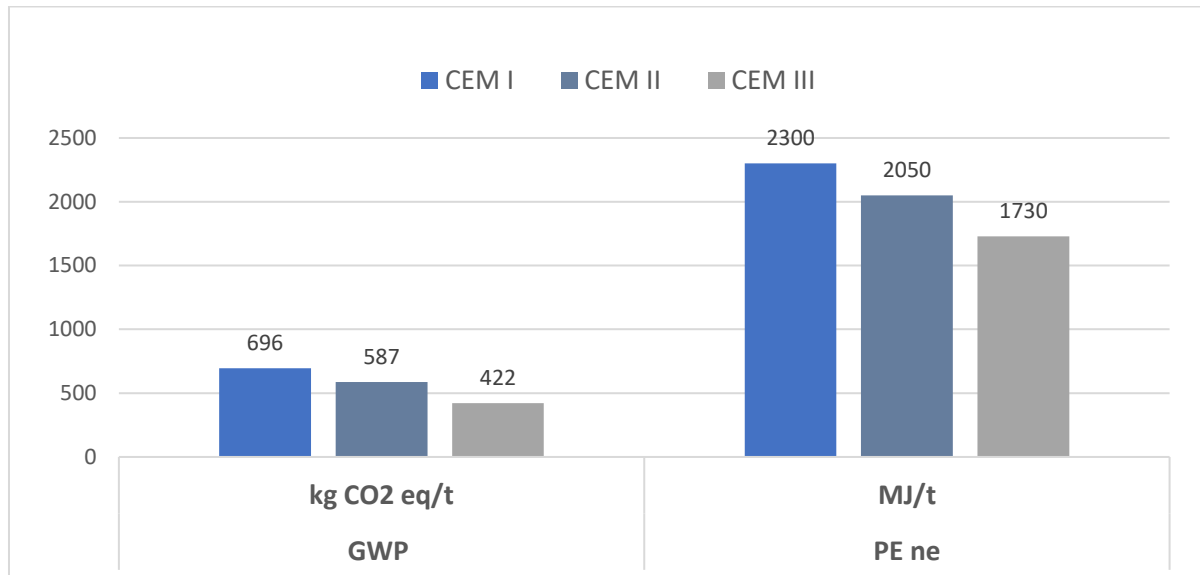


Abbildung 21 CO₂-Emission und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf bei der Herstellung verschiedener Zementarten [5]

Entsprechend kann der CO₂-Ausstoß von Zement durch den Einsatz von Zusatzstoffen reduziert werden. Beispiele sind die Beimischung von Flugasche, einem Nebenprodukt aus Kohlekraftwerken oder von Hüttensand, einem Nebenprodukt der Stahlproduktion in den Zement. Flugasche enthält Siliziumdioxid und Aluminiumoxid, die zur Zementherstellung genutzt werden können. Dies verringert den Bedarf an kalksteinbasiertem Zementklinker und senkt somit die CO₂-Emissionen [5]. Kritisch wird allerdings gesehen, dass sowohl Flugasche als auch Hüttensand in der Zementrezeptur bei steigendem Bedarf langfristig in Deutschland womöglich nicht mehr im gleichen Umfang zur Verfügung stehen [5]. Eine mögliche Alternative bieten CEM IV Zemente, die mit 45 bis 89 % einen breiten Bereich an Zementklinkeranteilen zulassen, aber nach aktueller Normung noch nicht alle Anforderungen an die erforderlichen Anwendungen erfüllen können.

Dennoch ist der vorgeschlagene Weg der Zementklinkerreduktion auch der Ansatz des hier entwickelten und eingesetzten Ökobetones. Die Forscher der Hochschule Bochum haben in Kooperation mit dem IBMB Braunschweig Fördermittel in Höhe von 175.000 € bei der Dyckerhoff-Stiftung eingeworben, um eine nachhaltigere Bindemittelrezeptur zu entwickeln. (s. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Erreicht wurde eine Betonrezeptur, die ca. 30% der CO₂ Emissionen im Vergleich zu einem bereits nachhaltigen mitteleuropäischen CEM III einsparen kann (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

1.3.1.2 Konstruktive Massenreduktion, Kassettendecken

Vor dem Hintergrund der o.g. Herausforderungen bei der Substitution von Zementklinkern durch Nebenprodukte industrieller Energieumwandlung oder Herstellungsprozesse liegt es nahe sich auch mit dem Weglassen von Beton in den Bauteilen zu beschäftigen. Möglichkeiten hierzu wurden frühzeitig kommuniziert und im weiteren Projektverlauf berücksichtigt. Ziel dieser Strategie ist die direkte Reduktion des Betonvolumens, z.B. durch Hohlkörper, (Spann-)Betonhohldielen oder die ursprünglich vorgeschlagenen Kassettendecken (vgl. Abbildung 22, bzw. [1]).

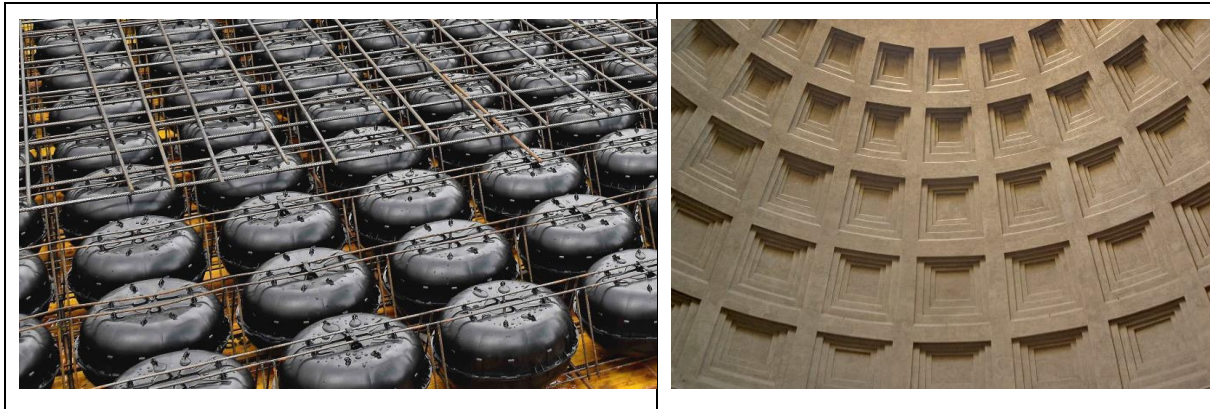


Abbildung 22 Volumenreduktion durch Hohlkörper- oder Kassettendecken (Bildquelle: Dr. Albert Andrei, Wikipedia)

Der Einsatz der Kassettendecken erschien dem Planungsteam allerdings als zu aufwendig und nicht wirtschaftlich. In Deutschland ist der Arbeitslohn hoch, der Aufwand für die Schalung der Kassetten wird als zu groß bewertet, und die Idee der Kassettendecke fallengelassen - auch wenn hier für die Materialersparnis keine Polypropylen-Formen wie bei den Hohlkörperdecken im Inneren des Betons notwendig sind.

Auch die Idee der Hohlkörperdecke wird im Kontext mit dem geplanten Sonderbeton kritisch gesehen. Es galt, dass man angesichts einer anstehenden Zulassung im Einzelfall das Thema nicht überfrachten wollte und deswegen zunächst auch Abstand von Hohlkörperdecken nahm. Dennoch ist das Einsparpotential durch Hohlkörperdecken groß: Aufgrund der Voruntersuchungen der ersten Projektphase könnten hiermit weiter rund 35% an Material und rund 25% an CO₂ eingespart werden [3]. Die eingegossenen Hohlkörper aus Polypropylen verursachen zwar ihrerseits auch wieder Aufwand, allerdings handelt es sich um Recycling-Material im zweiten Lebensabschnitt, so dass die Herstellungsemissionen nicht mehr im vollen Umfang angesetzt werden müssen (aber in der nachstehenden Grafik noch wurden).

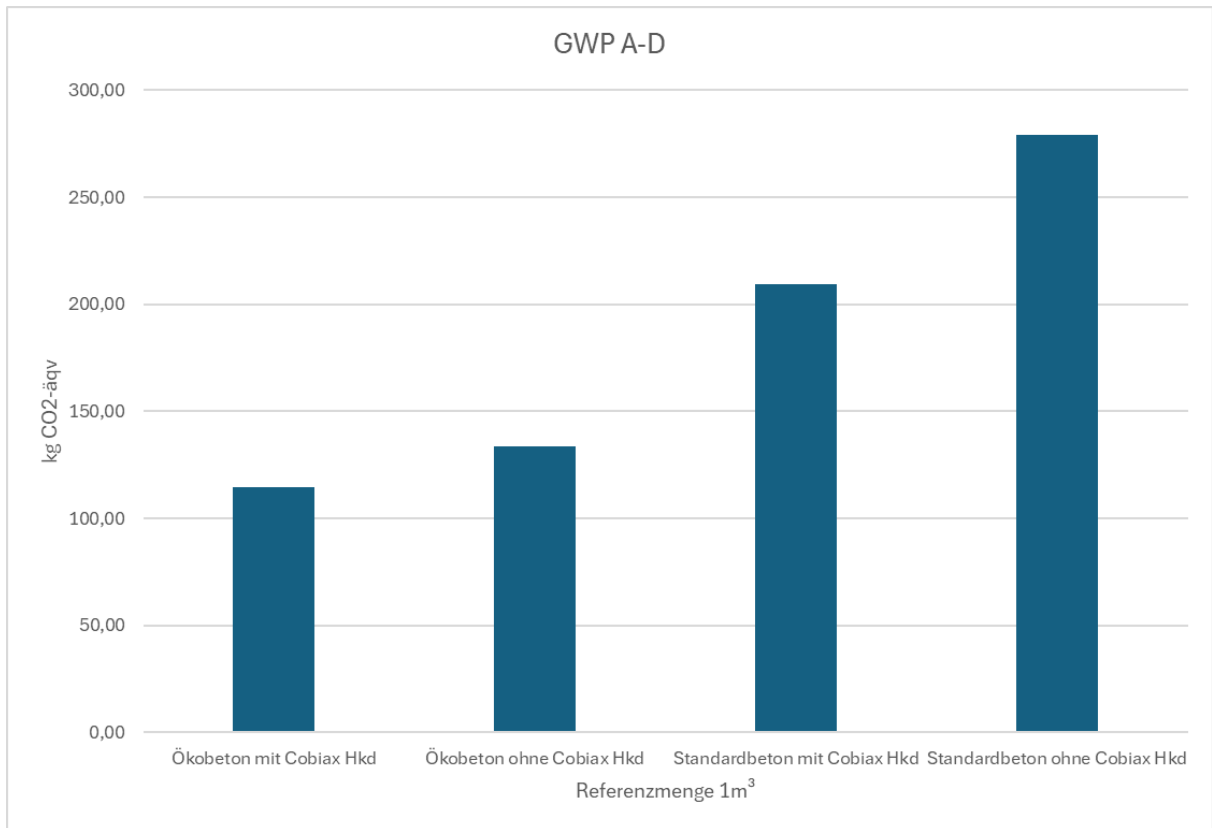


Abbildung 23 Vergleich GWP Total zwischen verschiedenen Cobiax-Betonvarianten

Die Verwendung der Cobiax Hohlkörperdeckenmodule führt zu einer Gesamtersparnis beim Energieverbrauch aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energien und der CO₂ Emissionen von ca. 15% beim Ökobeton und ca. 25% beim Standardbeton. Dies ist nachvollziehbar, da beim Standardbeton das gleiche Volumen mit einer höheren CO₂-Emission verdrängt wird.

Mit Ziegelrippen- und Holzbetonverbunddecken sind seit Beginn des Projektes noch weitere alternative Deckensysteme aufgekommen, die es zwar alle schon vorher gab, die aber durch die Pandemie mit Covid 19 und den anschließenden Ukraine-Krieg für die Baubranche verstärkt an Bedeutung gewonnen haben. Abbildung 24 und 8 zeigen beispielhafte Ausführungsarten.



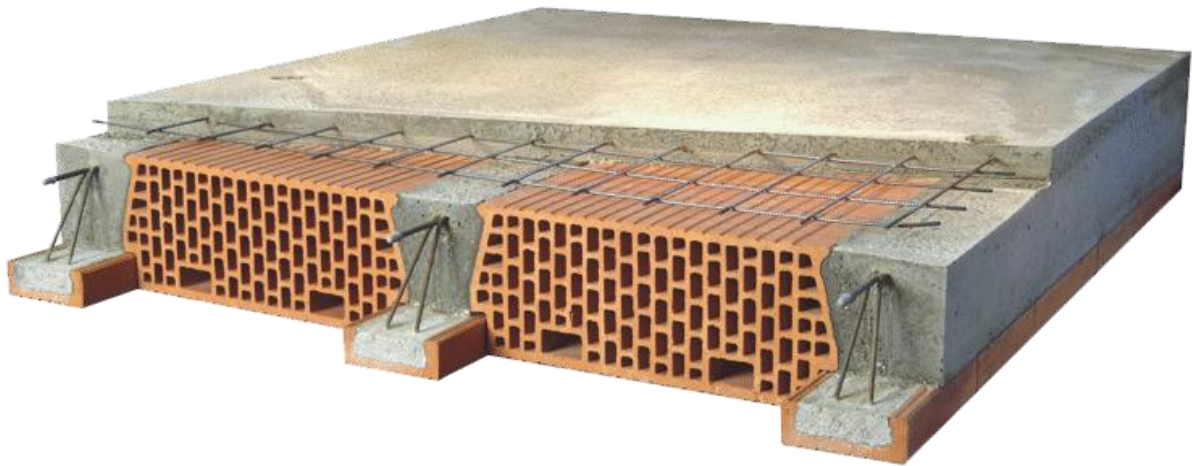
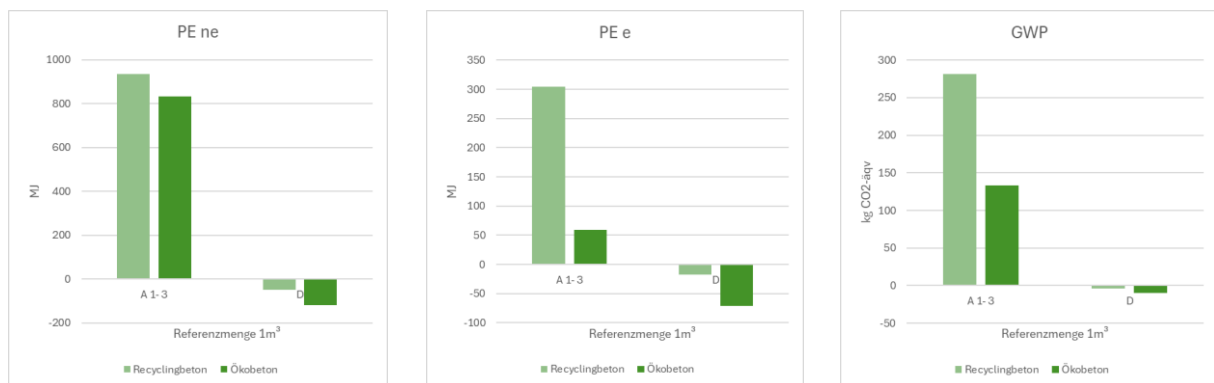


Abbildung 24 Betonsubstitution durch Holzbetonverbunddecken (beispielhafte Abbildung nach [6]) und Ziegelrippendecken (nach [7])

1.3.1.3 RC-Zuschläge

Über die Bedeutung von Beton Recycling wurde bereits umfangreich in der ersten Phase des Projektes berichtet, zudem ist es auch noch einmal ein Thema im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Grundsätzlich ist festzustellen, dass RC-Zuschläge die Ökobilanzdaten verschlechtern, da das RC-Material aufwendiger hergestellt wird als der Zuschlag aus natürlichen Quellen. Im Vergleich zum Abschluss der ersten Phase des Projektes ist festzustellen, dass etwa 1290 m³ an RC-Beton eingebaut wurden.



Die in den Diagrammen dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Referenzmenge von einem Kubikmeter um einen neutralen Vergleich zwischen den beiden Betonsorten zu gewährleisten.

1.3.1.4 Selbst Reparierender Beton

Eine große Faszination und Motivation für diese Arbeit war von Beginn an das römische Opus Caementitium. Offensichtlich waren die Römer in einer relativ energiearmen Zeit in der Lage, ein sehr haltbares Material zu konstruieren und einzusetzen, welches den Eigenschaften unseres Betones sehr nahekommt und auch eine große Dauerhaftigkeit besitzt, wie man an verschiedenen Gebäuden wie dem Pantheon oder dem Kolosseum in Rom sehen kann. Im Rahmen des Wahlfaches „Ökobeton“ an der Hochschule Bochum wurden in diesem Kontext

die Forschungsarbeiten des „Massachusetts Institute of Technology“ vorgestellt, in welchen die Theorie eines selbstheilenden Betons aufgestellt und untersucht wurde. Bei der Untersuchung der Stadtmauer in der Nähe von Rom fanden die Forscher kleine Kalkbröckchen im Gemisch des antiken römischen Betons. Nach ihrer These löst über Risse eindringendes Wasser im späteren Verlauf das Calcium aus diesen Brocken. In der Reaktion mit Wasser und Kohlenstoffdioxid zu Calciumcarbonat oder mit puzzolanen Bestandteilen, die die Römer ebenfalls in Form von Vulkanasche in ihrer Betone einbrachten, entsteht dann neues Material und die Lücken wurden geschlossen. Die Prozesse ließen sich durch im Labor nachproduzierte Mischungen wiederholen und bestätigen. Fehlstellen im Beton können sich so zum Teil selbst reparieren, was den Bauwerken eine höhere Lebensdauer ermöglicht. ([8]; [9])

Der moderne Beton ist dagegen erst zirka 150 Jahre alt - und hält, wie man vor allem an Brückenbauwerken in Europa beobachten kann, nicht ewig. Bereits in der Tragwerksplanung ist man sich bewusst, dass das Bauteil Mikro- und Makrorisse aufweisen wird ([10], [11]) Beschädigungen, die sich ohne frühzeitige Reparatur durch die Bewitterung und Temperaturspannungen sowie im Fall von Brücken durch dynamische Lasten immer weiter ausweiten und schlussendlich zur Korrosion der Bewehrung und dem Versagen des Bauteils führen können.

An der TU-Delft hat Hendrik Marius Jonkers daher versucht, mit Bakterien einen selbstheilenden Beton zu konstruieren. Die „Bacillus pseudofirmus“ und „Sporosarcina pasteurii“ genannten Bakterien werden in kleinen Tonkugeln zusammen mit Stickstoff, Phosphor und Calciumlactat in den Beton eingebracht. Ähnlich wie zuvor die Kalkbröckchen werden die Mikroorganismen durch eindringendes Wasser aktiviert und verschließen dann Risse bis zu 0,8 Millimeter, indem sie das beigegebene Calciumlactat zu Kalkstein umwandeln. Allerdings ist dieser Beton nach Aussagen von Jonkers noch doppelt so teuer wie konventioneller Beton, so dass weitere Forschung notwendig ist.([8]; [12])

Der Ansatz zur CO₂-Reduktion geht in diesem Fall über die Langlebigkeit des Bauteiles, was ein Plädoyer für gute Architektur ist.

1.3.1.5 Einsatz pflanzlicher Stoffe

Zur Reduktion der CO₂ Emissionen wird auch an pflanzlichen Zusatzstoffen geforscht, die entweder Zementanteile ersetzen oder die CO₂ Emissionen aus seiner Herstellung kompensieren. An der Ostschweizer Fachhochschule OST in Rapperswil forschen Prof. Simone Stürwald und ihr Mitarbeiter Etienne Blaser an einer Betonrezeptur, die zu Teilen aus Pflanzenkohle besteht[13]. Zwar wird Zement hier nicht substituiert, jedoch werden die Vorteile des Holzes, CO₂ zu binden, genutzt, um die Bilanz des Materials neutral ausfallen zu lassen. Die in einer Pyrolyseanlage erfolgende Umwandlung von Holzschnitzel in -kohle ermöglicht eine dauerhafte Speicherung des CO₂. Je Kubikmeter Beton können durch die Einlagerung der Asche so ca. 200 Kilogramm CO₂ dauerhaft gebunden werden [13]. Nach Abzug des Herstellungsaufwandes ergibt sich so ein annähernd klimaneutraler Beton. Während die Druckbelastbarkeit jener eines konventionellen Betons entspricht, müssen eventuellen Nachteile bezüglich der Dauerhaftigkeit und der Einsatzmöglichkeiten in weiteren Forschungsschritten überprüft werden.



Abbildung 25 Klimaneutraler KLARK-Beton aus der Schweiz [13]

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Forscherteam um Rajeev Roychand an der RMIT University in Melbourne. Hier wird Kaffeesatz genutzt, der mittels Pyrolyse zu Kohle umgewandelt wird und als Substitut den Sandanteil des Betons verringern soll [14]. Dies reduziert zwar nicht die Emissionen bei der Zementherstellung, vermeidet jedoch die Freisetzung von Treibhausgasen wie Methan und CO₂, die andernfalls bei natürlichen Verrottungsprozessen entstehen würden. Gleichzeitig werden die natürlichen Ressourcen geschont. Die Forschungen befinden sich im Anfangsstadium und werden durch weitere Arbeit und Tests fortgeführt [14].

Die als Maniok bekannte Cassavapflanze bietet ebenfalls eine Grundlage für Forschungsarbeit als CO₂reduzierende Komponente einer Betonmischung. Hierbei dient in diesem Fall die beim Verbrennen ihrer Schalen anfallende Asche als Zementersatz. Die Schalen fallen bei Verwendung der Pflanze in großen Mengen an, stellen also ein Abfallprodukt dar. Aus den Schalen kann darüber hinaus Stärke gewonnen werden, die als Zugabe zum Beton dessen Verarbeitungseigenschaften verbessert. Die ursprünglich aus Südamerika stammende Cassavapflanze bedarf zum Wachstum ein tropisches bis subtropisches Klima und kann nicht in mitteleuropäischen Breitengraden angebaut werden. Ihre Verwendung bei der Zementsubstitution würde daher mit hohen Transportemissionen einhergehen. Der regionale Einsatz sollte demzufolge priorisiert werden, verspricht aber im Zuge weiterer Forschungsarbeit hohes Potential. [15]

1.3.1.6 CO₂ Upcycling

Eine Spielart des in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ausführlicher beschriebenen CCU-Prozesses, der einen wesentlichen Bestandteil der Dekarbonisierungsstrategie der Zementindustrie darstellt, ist die Karbonatisierung von definierten Mineralien (z.B. Magnesium oder Calciumsilikate) [15]. Diese können dann der Zementproduktion wieder zugegeben werden. Eine Studie der Heriot-Watt University und des Instituts für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) zeigt, dass durch die Integration von CO₂-Mineralisierung im Zementproduktionsprozess Emissionen um bis zu 33 Prozent gesenkt werden können, sofern bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. [15]

Dieses Verfahren wurde in Berlin im Projekt „CORE- Ressourcenschonender und klimaoptimierter Beton in Berlin“ erfolgreich für RC-Betonzuschläge eingesetzt. [16]

Wie erwähnt wird ein Großteil der CO₂ Emissionen der Zementherstellung nicht durch die energetischen, sondern durch chemische Prozesse verursacht. Ausgangsstoff der Zementproduktion ist Kalkstein, der durch Reaktionen beim Brennen Kohlenstoffdioxid freisetzt. Als Umkehrung dieses Vorganges kann die Carbonatisierung des Betons betrachtet werden, bei der CO₂ im Laufe der Zeit durch den Beton aufgenommen und gebunden wird. Nach Aussage von Zhu Liu vom California Institute of Technology in Pasadena nehmen Betonbauteile durch Karbonatisierung über die Jahre sogar fast die Hälfte des emittierten Kohlendioxids wieder auf - es bleibt aber doch eine Nettoemission von gut 50 Kilogramm je Tonne Beton, die entsteht [12].

Allerdings verändert dieser Prozess das alkalische Milieu, welches im Normalfall den Bewehrungsstahl vor Korrosion schützt. Betrachtet man jedoch nur die Dauerhaftigkeit des Betones, so wird diese durch die Anlagerung von CO₂ sogar erhöht. Entsprechend kann Kohlendioxid an Betonrecyclat bzw. RC- Zuschlägen relativ einfach angelagert werden. In Kombination mit CO₂ reduzierten Zementen konnten im „CORE“ Projekt die GWP-Emissionen mit dem behandelten Zuschlag um bis zu 20 Prozent reduziert werden. Nach Aussagen der Forscher wird die Reduktion hierbei umso größer, je mehr RC-Zuschläge eingesetzt werden können. Wie beim Ökobeton des FLM hatten die eingesetzten Zuschläge und CO₂-reduzierten Zemente keinen negativen Auswirkungen auf die Betoneigenschaften. [16]

Aufgrund des hohen Energieaufwandes des Verfahrens und des zusätzlich anfallenden Abbaus und Transports der benötigten Mineralien sollte jedoch an erster Stelle der Versuch zur gänzlichen Vermeidung stehen. Auf diesen Suffizienzgedanken wird auch im unteren Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** „Entwicklung von Nachnutzungsszenarien für Bauteile aus Ökobeton“ eingegangen.

1.3.2 Entwicklung eines Ökobetons für das Projekt FLM

Im Rahmen der zweiten Stufe des Forschungsprojektes wurden zunächst die unterschiedlichen Möglichkeiten eines CO₂ reduzierten Betons eruiert (vergleiche Kapitel 5. 2.1). Zudem wurden verschiedene Zementhersteller und Betonwerke angesprochen, ob sie sich in der Lage sehen, für das Bauvorhaben Freilichtmuseum Detmold konkret einen CO₂ reduzierten Beton mitzuentwickeln und anzubieten. Nach mehreren abschlägigen Bescheiden wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig (IBMB) mit Professor Dr. Dirk Lowe und mit seinem Mitarbeiter Dr.-Ing. Hans Werner Krauss kompetente Partner gefunden, die bei der Entwicklung und Umsetzung eines CO₂ reduzierten Betones unterstützen konnten.

An dem Gebäude sollten zahlreiche Bauteile der Primärstruktur aus Stahlbeton gefertigt werden (z.B. die Fundamente, die Bodenplatte, aussteifende und erdberührte Wände sowie Stützen und Unterzüge und vor allem die Deckenplatten). **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt einen Überblick über die geplanten Betonbauteile, in Summe gut 3300 m³ Beton.

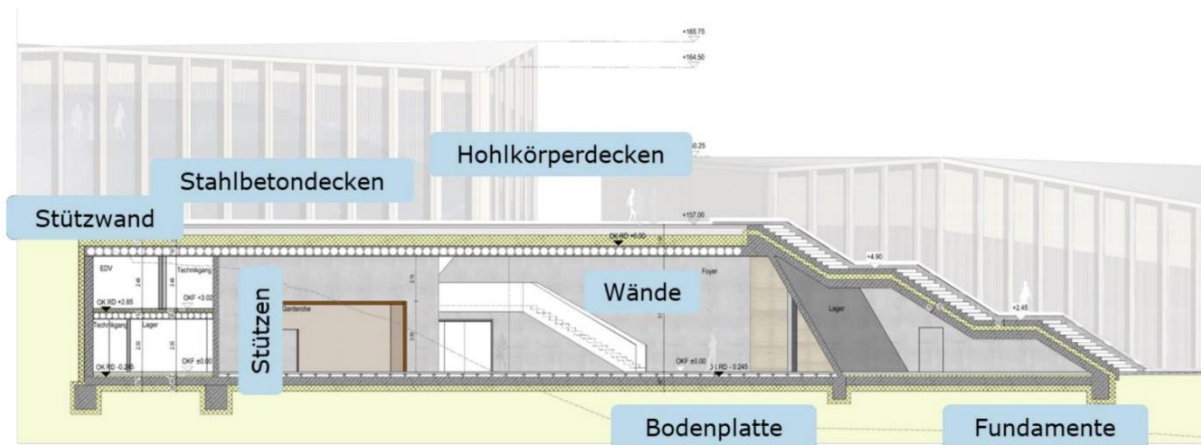


Abbildung 26 Lage der in Frage kommenden Betonbauteile im Gebäude; Quelle ACMS

Die Expositionsklassen reichen hierbei von XC 3 bis herab zu XC 1, wobei zu Beginn noch nicht klar war, ob die Bauteile aus sog. „Ökobeton“ (so der Arbeitstitel im Planungsteam) allen Anforderungen gerecht werden können. Insbesondere die WU- Anforderung von erdberührten Bauteilen und die Anforderungen an die Freibewitterung der Haupttreppe zwischen den Gebäuden führte zunächst dazu, dass diese Bauteile nicht in Ökobeton gedacht wurden. Vor diesem Hintergrund wurde beschlossen, im Zuge der notwendigen Zulassungen im Einzelfall die maximalen Anforderungen der Expositionsklasse XC 3 zu realisieren, und die geringeren Anforderungen über zu erfüllen, um nur ein Material bauaufsichtlich genehmigen zu lassen. Gleichzeitig sollte der Ökobeton nicht für die WU-Beton-Bauteile oder die frei bewitterte Treppe ausgelegt werden. Für die Entwicklung der Betonrezeptur wurde ein eigenes Forschungsvorhaben bei der Dyckerhoff Stiftung beantragt und bewilligt, dessen Ergebnisse für den Ökobeton in diesem Bauvorhaben aber auch in anderen Bauvorhaben verwendet werden können.

Im Zusammenhang mit der Verwendbarkeit des Betons waren folgende Punkte von Bedeutung:

- Unterschreitung der Emissionswerte im Vergleich zu einem konventionellen Beton
- Herstellung als regionaler Baustoff; Herkunft der Einzelkomponenten im 200 km Rahmen des DBU- Projektes
- Vergleichbare Druck- und Zugfestigkeiten mindestens jedoch C20/25, was der vom Tragwerksplaner geforderten Güte entspricht
- Vergleichbare Verarbeitbarkeit wie ein konventioneller Beton
- Einhalten der technischen Mindestanforderungen in Bezug auf Kriech- und Schwindverhalten
- Karbonatisierungs- Verhalten und dauerhafter Schutz der Bewehrung

Die Vorschläge der Hochschule Bochum aus der ersten Projektphase gingen jedoch über die Verwendung eines CO₂- reduzierten Betones hinaus, indem zum Beispiel mit dem Prinzip der Hohlkörperdecke oder bei einer Kassettendecke insgesamt Beton in der Größenordnung von 30% substituiert werden und durch die Verwendung von Recyclingzuschlägen eine Ressourcenschonung möglich werden sollte [1]. Beide Verfahren sind bauaufsichtlich zugelassen und konnten ohne weitere Anpassung für die Stahlbetonbauteile des Freilichtmuseums Detmold (FLM) verwendet werden.

Durch das IBMB wurden in zwei Durchläufen verschiedene Varianten eines zementreduzierten und damit auch CO₂-reduzierten Betones entwickelt, und durch die Hochschule Bochum ökologisch bewertet. Vom Prinzip her wurde ein CEM III weiterentwickelt und Zementanteile durch Hüttensand- und Kalksteinmehl substituiert. Bereits in ersten Versuchen zeigte sich eine sehr hohe Druckfestigkeit der Versuchsbetone, so dass eine zweite „Entwurfsrunde“ notwendig wurde, um den Beton etwas weniger druckfest zu machen und mehr in den Bereich C20/25 zu kommen. Als Benchmark wurde zuletzt die Druckfestigkeit eines C30/37 gesetzt. [17]

Auf der Basis des Dyckerhoff-Projektes wurden dann drei leicht unterschiedliche Betonrezepturen für die Zulassung im Einzelfall ausgewählt. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das GWP dieser Rezepturen im Vergleich zu zwei selbstgewählten Referenzbetonen sowie einem Standardbeton der verwendeten Datenbank (ecoinvent). Die Referenzbetone wurden unter dem Gesichtspunkt bereits am Markt verfügbarer, CO₂-reduzierter Betone in der Ökobilanz nachgebildet, wobei der Ref2X, auf Basis eines CEM III/A 52,5 N, für die geplanten technischen Anforderungen im Projekt tatsächlich nicht ausreichen würde ([17]; [18]). Ziel war es sich explizit nicht mit einem Standardbeton zu vergleichen, der genauso in der verwendeten Software abgebildet ist.

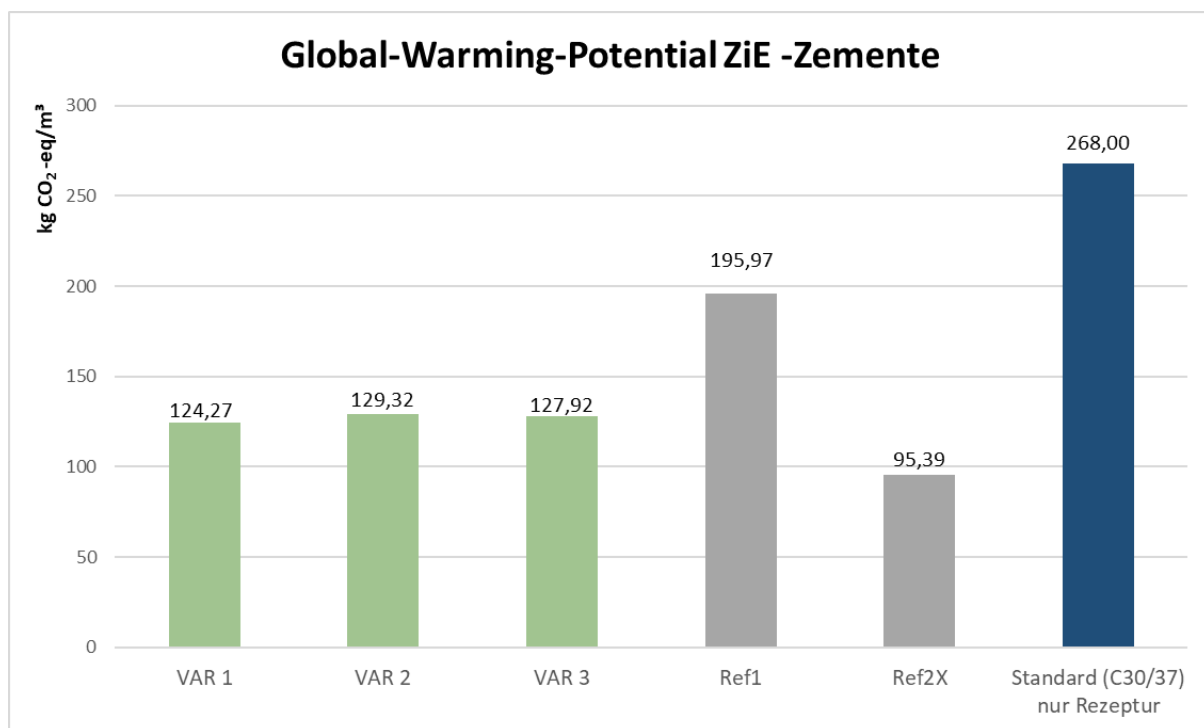


Abbildung 27 Ökologische Betrachtung der finalen Rezepturen zur ZiE im Vergleich zwei Referenzbetonen und dem Standarddatensatz. [18]

Im Vergleich zu dem bereits ökologischeren Referenzbeton (Ref1) kann der für dieses Projekt geplante Ökobeton in allen Varianten noch einmal gut 30% an CO₂-Emission einsparen. Gleichzeitig muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass sich die Ergebnisse aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nicht mit den Ergebnissen anderer Studien vergleichen lassen. Sie sind darauf ausgelegt, einen möglichst realistischen internen Vergleich zu ermöglichen, um die Feinheiten und Unterschiede im Laufe der Rezepturentwicklungen abbilden zu können.

In Bezug auf die Verarbeitbarkeit wurde im Rahmen der Rezepturentwicklung die Konsistenzklasse F4 (Ausbreitmaß zwischen 49 und 55 cm) angestrebt. Es wurde festgestellt, dass die Frischbetone im Labor ein sehr gutes Fließvermögen haben und die Konsistenzen zwischen F2 und F6 in einem weiten Feld eingestellt werden können [17]. Dies konnte leider für die Baustelle später nicht bestätigt werden.

Auch im Kriech- und Schwindverhalten zeigten die Proben der Ökobeton-Varianten Werte, die mit den normgerechten Referenzbetonen der ZiE-Prüfung vergleichbar sind. Hierbei lagen die Kriechzahlen durchgängig unterhalb der Grenzwerte, beim Schwindverhalten zeigt sich dagegen ein etwas stärkeres anfängliches Schwinden, auch wenn die Werte nach der Beobachtungszeit von 120 Tagen immer noch unterhalb der Erwartungswerte liegen. [17]. Vorsorglich können hier Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden.

Von besonderem Interesse könnte die Karbonatisierungstiefe bei den Ökobetonvarianten sein – auch wenn sie im vorliegenden Fall nur im Inneren des Gebäudes und damit im Trockenen eingesetzt werden.

Die Rezepturen der Varianten werden an dieser Stelle nicht offengelegt, die ebenfalls an dem Forschungsvorhaben als Lieferant beteiligte Firma HOLCIM hat jedoch inzwischen auch eigene, zugelassene, Zemente mit reduzierter CO₂-Emission bei der Herstellung herausgebracht (sog. ECOplanet-Zemente [19]). Im Zuge der ZiE wurden drei Rezepturen des IBMB auf die oben genannten Kriterien untersucht. Alle drei erfüllten die technischen Vorgaben im Vergleich zu einem Referenzbeton (CEM III/A 42,5 N) und könnten so theoretisch und bauaufsichtlich korrekt für das Bauvorhaben eingesetzt werden [17]

1.3.3 Bewertung -

Im Hinblick auf die Gesamtbilanz des Betons in den Modulen A1-3 fällt zunächst auf das der Ökobeton bedingt durch einen 35% höheren Masseanteil im Gebäude einen höheren Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien hat (PE ne) als der Recyclingbeton. Dieser beträgt jedoch nur ca. 18,6%. Bei dem Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Quellen liegt der Unterschied bei ca. 6,5%. Bei der Betrachtung des Gesamtwerts GWP fällt auf, dass der Ökobeton trotz höhere Masse im Gebäude ca. 17,3% weniger kg CO₂-äqv. emittiert als der Recyclingbeton.

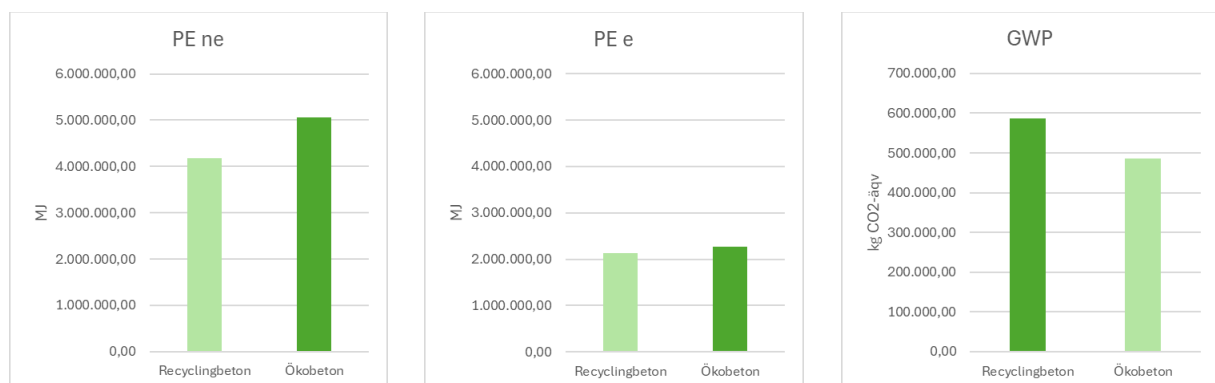


Abbildung 28 Ergebnisse der Kategorien Beton und Ökobeton für das Gesamtgebäude

Die Diagramme zeigen die Ergebnisse aus der Gesamtbilanz von Recyclingbeton und Ökobeton. Die Massen des gelieferten Transportbetons auf Basis der Ökobetonrezeptur beläuft sich auf 2004,5m³, die des insbesondere für die Gründung des Gebäudes verwendeten Recyclingbetons auf 1290,75m³. Dies entspricht einem Verhältnis von ca. 6 zu 10. Somit wurde eine deutlich höhere Menge an Ökobeton im Gebäude verbaut.

1.3.4 Ökonomie des Ökobetones

In den ersten Kostenschätzungen wurde davon ausgegangen, dass der sogenannte Ökobeton im Vergleich zu einem konventionellen Beton nur marginale Mehrkosten hat. Ähnliche Betone befanden sich schon in der Entwicklung und die Substitution von Portlandzement durch Gesteinsmehle und Hüttensand führten auf den ersten Blick nicht zu Mehrkosten. Dennoch hatten die Architekten pauschal 100.000 € an zusätzlichen Kosten für die Gesamtmaßnahme „Ökobeton“ in die Kostenschätzung eingestellt, wobei die notwendige Zulassung im Einzelfall in diesem Kostenansatz nicht enthalten war. Nach einschlägigen Erfahrungen wurde in diesem Punkt mit etwa 60.000 € gerechnet.

Für die Entwicklung der Betonrezeptur wurde, wie schon berichtet, ein separates Forschungsprojekt beantragt und außerhalb dieses Projektrahmens bearbeitet. Die sonst notwendige Entwicklungsarbeit eines Ökobetons im Projekt zu Lasten des Bauherrn konnte auf diese Weise mit 25 - 30.000 € entlastet werden.

Im Zuge der Ausschreibung wurden jedoch Einheitspreise für den Spezialbeton aufgerufen, die je nach Einbauort und Bauteil bei ca. 100 € mehr je m³ lagen, so dass der Einsatz tatsächlich für einen Moment vollständig gefährdet war. Hintergrund war die Notwendigkeit der Betonwerke zumindest eine Produktionslinie auf die Inhaltsstoffe des Sonderbetones umzustellen – und für die Dauer der Baustelle in wechselnder Auslastung vorzuhalten – eine logistische Schwierigkeit, die so im Vorfeld nicht bedacht worden war. Als Resultat dieses Ausschreibungsergebnisses und einer gleichzeitig stattfindenden Kostensteigerung aufgrund des Ukraine-Krieges wurde entschieden, dass die Bodenplatte und Fundamente nicht aus dem entwickelten Ökobeton hergestellt werden sollten. Um dem besonderen Anspruch des Gebäudes dennoch gerecht zu werden, wurde für diese Bauteile RC-Beton vorgesehen.

Über die Bedeutung von Beton Recycling wurde bereits umfangreich in der ersten Phase des Projektes berichtet, zudem ist es auch noch einmal ein Thema im Kapitel 1.3.6.

Ein weiterer Aspekt der Ökonomie betrifft die Verarbeitbarkeit des Sonderbetons auf der Baustelle:

Als C30/37 fällt der geplante Beton in die Überwachungsklasse 2 nach DIN EN 13670/DIN 1045-3; entsprechend ist bei allen Betoniervorgängen ein Prüfwagen anwesend.



Abbildung 29 Prüfkörper zur Güteüberwachung und Rüttelplatte zur Bestimmung des Ausbreitmaßes

Unmittelbar am Transportmischer entnommen, werden hier überwiegend Ausbreitmaße zwischen 40 -60 cm festgestellt. Nach Aussagen des Herstellers (Fa. Garant) ist eine einheitliche Einstellung der Konsistenz mit der Rezeptur jedoch nicht zu erreichen; Jeder Fahrmischer wird ab Werk nach Rückmeldung von der Baustelle einzeln eingestellt. So wird der PCE Zusatz halbiert und das Fließmittel annähernd verdoppelt da der Beton vorher noch steifer ist und noch schneller anzieht. 10 min Verzögerung (z.B. Berufsverkehr) lassen einen „anderen“ Beton auf der Baustelle ankommen. (Aussagen Herr Krusemeier, Garant; 11.09.2023,)

Der angelieferte Beton ist zudem extrem schwer zu verarbeiten, zieht quasi sofort an. Beim Betonieren mit der Kranbombe sitzt diese nach 20 min zu, nach 40 Min. kann man sie nur noch umzudrehen und das Material entsorgen. Zudem muss das bereits angezogene Material im Kübel nach jedem Wagen gereinigt werden, da sonst die abgebundenen Reste die Bombe zusetzen und der nächsten Lieferung sofort wieder Wasser entziehen. Gleiches gilt auch für die Förderung mit dem Pumpenwagen (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und 11): auch Reste auf dem Gitter des Anlieferungsschachtes des Pumpenwagens oder in dem Schacht selber binden unverzüglich ab, und setzen Gitter und Pumpensumpf zu. Entsprechend muss auch hier ständig gereinigt werden (Das Material wird nach unten in die Förderung geschoben, ggf. auch etwas nachgespült). – Arbeitsschritte, die bei konventionellem Beton in dem Maße nicht nötig sind bzw. einmalig zum Ende des Betoniervorganges anfallen. Die Arbeit mit dem Spezialbeton ist darüber hinaus auch extrem gefährlich für die Maschine, da schon eine Verspätung des nächsten Fahrmischer dazu führen kann, dass der Beton in der Pumpe abbindet (20 min). Das erneute Anlaufen nach dem Wechsel der Fahrmischer ist selbst nach 10 Minuten nur mit sehr hohem Druck möglich, der Arbeitsaufwand der Maschine unmittelbar zu beobachten und zu hören. Zur Förderung des Betons muss ebenfalls ein erhöhter Druck (2x über dem Normaldruck) gefahren werden, der Dieselbedarf des Pumpwagens/h ist zudem 4fach höher als der Durchschnittswert bei konventionellem Beton¹.

¹ Aussagen des Pumpenfahrers und eigene Beobachtung

All dies führt im Umgang mit dem Material zu erhöhtem Aufwand und Mehrkosten, die evtl. in Sicherheitszuschlägen des Angebotes abgebildet waren und in einem Forschungsprojekt auch hinnehmbar – aber außerhalb dessen noch nicht gut kalkulierbar sind. Entsprechend ist auch hier noch Forschungsarbeit zu leisten, um jenseits von Laborversuchen zu einem gut verarbeitbaren Produkt zu kommen.



Abbildung 30 Pumpenwagen



Abbildung 31 Einlauf der Pumpe

Die Verarbeitung des Betons selber ist für die Hochbauarbeiter Schwerstarbeit (am Ortstermin zudem Außentemperaturen von 30°C...). Das Verteilen des wenig fließenden Materials (vgl. oben, Ausbreitmaß am Prüfwagen war 56 cm, was der Konsistenzklasse F5 (fließfähig) entspricht) ist Schwerstarbeit, selbst unter Zuhilfenahme des Rüttlers, muss das Material teilweise noch mit der Schaufel verteilt werden, fließt eben nicht von alleine in eine gleichmäßig waagerechte Schichtdicke/Lage. Die relativ hohen Temperaturen beim Ortstermin sind hierbei nicht förderlich, aber auch nicht Grund für die oben angeführten Beobachtungen, was der zuständige Polier/ Baustellenleiter bestätigt (Aussagen Bauarbeiter und Polier, Fa. Prior). (Anm. des Verfassers: die Lehmbauer plädieren für Nachtarbeit, dann ist es kühler, die sind aber auch auf Montage).

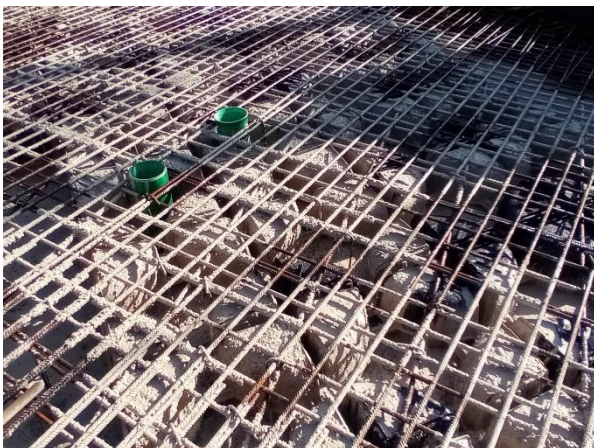


Abbildung 32 Bilder betonieren

Positiv wird festgestellt, dass der verwendete Spezialbeton sich nicht entmischt – weder beim Pumpen, noch beim Rütteln. FA. Garant liefert mit sehr konstanter Sieblinie, die Körnung und das gesamte Mischungsverhältnis ist sehr stabil. Auch das Ergebnis der Sichtbetonflächen bestätigt diese hohe Qualität des Ökobetones (und seiner Verarbeitung durch die Ausführenden!). Die durchgeführten Drucktests mit den Probewürfeln der Güteüberwachung lagen bisher immer deutlich über der Anforderung eines C30/37.



Abbildung 33 Sichtbetonfläche aus Ökobeton

Interessanterweise war dies bereits bei der Erstellung der Betonrezeptur bekannt: „Die Klärung der chemisch-physikalischen Ursachen für die nachteilige Wirkung des Kalksteinmehls auf das Rücksteifen und die Viskositätserhöhung sind Gegenstand der internationalen Forschung und noch nicht gänzlich geklärt. Die derzeit vielversprechendste Hypothese lautet, dass sich hochfeine Kalksteinmehlpartikel beschleunigend auf die Anfangsreaktion des Zements auswirken, da die Partikeloberflächen sehr gute Substrate für die Ausfällung von Hydratationsprodukten aus der Porenlösung darstellen.“ [20]. In der weiteren Entwicklung wurde jedoch davon ausgegangen, dass diese Effekte durch den Zusatz von Fließmitteln kompensierbar sind.

1.3.5 Handlungsempfehlungen für zukünftige Projekte

Für zukünftige Projekte können die folgenden Empfehlungen gegeben werden:

- Besseren Beton entwickeln /Fortschreiben der Entwicklung

- Verwendung CO₂-reduzierter Bindemittel, Reduktion von Beton durch die Verwendung alternativer Baustoffe Ziegel als Wand / Holz als Träger,
- Materialoptimiertes Bauen
- Einsatz zirkulärer Baustoffe
- Einsatz regenerativer Energien für Herstellung und Transport
- Implementierung der Baustoffe in Urban-Mining Datenbanken

Diese großen Handlungsstränge werden im Folgenden etwas weiter ausgeführt.

Die Zementindustrie unternimmt derzeit jede Menge Versuche, die CO₂-Emissionen der Zementherstellung zu reduzieren.

Ein wesentlicher Ansatz ist das Auffangen der CO₂-Abscheidungen des Produktionsprozesses bei der Zementherstellung durch Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS). [5]

Durch CCU werden Kohlenstoffverbindungen wie Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid aus Gasgemischen extrahiert und anschließend einer neuen Nutzung zugeführt. Diese kann zum Beispiel in Kombination mit Wasserstoff zu der Herstellung von Kunststoffen, Lösungsmitteln oder Treibstoffen führen.

Das Carbon Capture and Storage (CCS) hingegen ist eine Technologie, um Kohlendioxid aus Abgasen oder Produktionsprozessen abzuscheiden und langfristig zu speichern. Die Speicherung erfolgt in Porenraum oder offenem Gefüge spezieller geologischer Formationen, zudem kommen ausgeförderte Lagerstätten fossiler Energieträger (z.B. Erdöl- oder Erdgaslagerstätten) in Betracht. „Weltweit waren im Jahr 2022 Anlagen mit einer Speicherkapazität von ca. 244 Mio. Tonnen in der Entwicklung oder bereits in Betrieb“. [21]. Die Technologie wurde ursprünglich für Gas- und Kohlekraftwerke entwickelt, kann aber auch in der Zementproduktion angewandt werden. Kritisch ist zu sehen, dass das eingelagerte CO₂ mit Fracking-ähnlichen Verfahren in den Untergrund verpresst werden muss, und die geologischen Voraussetzungen natürlich vorhanden sein müssen. Auch der Energieaufwand für die CC-Prozesse wird in der Fachwelt kritisch diskutiert. „Entscheidend für die internationale Positionierung der EU und Deutschlands ist, dass durch den Einsatz von CCS keine Klimamaßnahmen in solchen Sektoren verlangsamt werden, wo in diesem Jahrzehnt effektive, kosteneffiziente Alternativen verfügbar sind.“ [22]

Im Bereich der Energieversorgung ist entsprechend die direkte Nutzung erneuerbarer Energien vorzuziehen. Dennoch sind nach allgemeiner Auffassung negative Emissionen, also das Entziehen von CO₂ aus der Atmosphäre, notwendig, um die Klimaziele zu erreichen, da wir zum jetzigen Zeitpunkt nicht alle Verbrennungsprozesse durch andere Verfahren ersetzen können. Für die Zementindustrie sind diese Ansätze vor allem für den Produktionsprozess von Bedeutung da etwa 55-60% der CO₂-Emissionen den chemischen Prozessen während der Zementherstellung zuzuordnen sind, und somit kaum zu vermeiden.

Mehr als ein Drittel der CO₂ Emissionen in der Zementherstellung ist dagegen dem Energieaufwand für die Klinkerherstellung zuzuordnen. Hier ergeben sich direkte Einsparpotenziale, indem verstärkt erneuerbare Energien wie grüner Strom oder langfristig auch Wasserstoff eingesetzt werden können. Auch aktuell nutzen viele Zementklinkerwerke bereits alternative Brennstoffe wie Hausmüll oder Tiermehl zur Substitution.

Ein weiteres Handlungsfeld ist die stoffliche Zusammensetzung der Bindemittel, im Prinzip der hier gewählte und in diesem Projekt verfolgte Weg. Möglichkeiten und Alternativen wurden bereits im Kapitel 1.3.1 vorgestellt, so dass dieser Punkt hier nicht weiter ausgeführt werden soll. Grundsätzlich muss dieser Punkt aber auch gefordert sein: wie im GEG müssten die öffentlichen Bauträger als beispielhaft vorgehen und in ihren Ausschreibungen klimaneutraleres Bauen einfordern. Das ist vielleicht auch der Punkt, um einmal Danke zu sagen in Richtung des Landschaftsverbandes Westfalen Lippe (LWL), aber auch in Richtung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und der Dyckerhoff Stiftung, deren Förderung nachhaltiges Bauen in diesem Fall überhaupt erst möglich gemacht hat.

Jenseits der Zementproduktion besteht natürlich auch ein Nachhaltigkeitsfeld in der Strategie der Suffizienz. So wird aktuell an der Hochschule Bochum (und nicht nur dort) über das grundsätzliche Weglassen von Beton diskutiert, indem andere Bauweisen die gleichen Funktionen übernehmen können. Neben dem kompletten Ausweichen auf die Holzbauweise, bieten sich auch im Massivbau Möglichkeiten Beton zu vermeiden. So könnten Bodenplatten wieder zwischen die Streifenfundamente gearbeitet werden und als nicht tragende Bauteile aus anderen Materialien bestehen-So wie das in den historischen Gebäuden des Museums der Regelfall ist. Tür oder Fensterstürze könnten als vorgefertigte bewehrte Ziegelemente betonfrei ausgeführt werden. Es wird eine spannende Frage für die Forschung sein, wie weit man in dieser Substitution gehen kann. Durch die Ergänzung von Anforderungen des Klimaschutzes im Baurecht und in Normen könnten dann klimafreundlichere Materialien gefördert werden.

Jedoch auch innerhalb einer Beton orientierten Bauwelt, eines Bauens mit Beton bieten sich Optimierungspotentiale. So existieren Forschungsansätze, in denen durch die präzise Analyse eines Tragwerks Material nur noch dorthin gebracht wird, wo es für den Lastabtrag oder aus statischen Gründen notwendig ist. Aktuell werden Betonbauteile auf der Grundlage der größten Lastannahme bemessen und dann einheitlich (zum Beispiel mit homogener Bauteilstärke) betoniert. Die Alternative besteht darin die Bauteilstärke oder innere Struktur so zu optimieren, dass das Material nur an den relevanten Punkten vorhanden ist. Denkbar sind zum Beispiel Fertigteile mit unterschiedlichen Bauteilstärken oder Wände, die bei gleicher äußerer Wandstärke mit unterschiedlichen inneren Strukturen gedruckt sind.

Als Beispiel für derartige Strukturen kann die 717 m² große Kassettendecke des neuen Bauhofes in Bludenz herangezogen werden, für die 792 Verdrängungskörper als verlorene Schalung aus Beton gedruckt wurden. Im Ergebnis sollen so ca. 25% CO₂ äqv im Vergleich zur konventionellen Bauweise eingespart worden sein (nachzulesen auf ingenieurbau.de [23]). Als deutsches Beispiel kann das gedruckte Haus in Beckum dienen (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**; [24]), welches bereits einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten des Betondrucks liefert. Hierbei ist die Technologie nicht auf Beton eingeschränkt, sondern kann zunehmend auch für Lehm oder andere pastöse Baustoffe genutzt werden.



Abbildung 34 Baustelle des gedruckten Hauses in Beckum, Bildquelle Ing.-Büro Schiessl-Gehlen-Sodeikat [24]

Ein Nachteil dieser Technologie könnte es allerdings sein, dass Einbauteile nur für die individuelle Einbausituation geeignet sind. Die pauschale Wiederverwendung zum Beispiel einer vorkonfektionierten Betonplatte in den Abmessungen 2,5 * 6 Meter bei wechselnden Nutzungen wäre nach diesem Prinzip aufgrund unterschiedlicher Lastannahmen vielleicht eher nicht möglich.

Vor diesem Hintergrund kommt man schnell zu der Erkenntnis, dass eine Nachnutzung zirkulär angedachter Bauelemente nur möglich ist, wenn die Randbedingungen und Qualitäten ihrer Herstellung transparent verfügbar sind, man also weiß, welche Lastannahmen beispielsweise bei der Herstellung einer Betonplatte zugrunde gelegt wurden und mit welchen Qualitäten dieses Bauteil dann tatsächlich ausgeführt wurde. Erst mit dieser Kenntnis wird ein Urban-Mining der anthropogenen städtebaulichen Ressourcen möglich. Vorreiter in diesem Sinne ist z.B. die Online-Datenbank „Madaster“. [25]

Die nachstehende Grafik aus einem Vortrag von Johannes Ruppert an der Hochschule Bochum visualisiert die vorangegangenen Handlungsfelder und noch einmal zusammenfassend aus der Sicht des Verbandes der Zementindustrie (vdz).



Abbildung 35 Vorschläge für Technologien und Innovationen einer klimaneutraleren Betonbauweise nach Ruppert [5]

Selbstverständlich als Handlungsempfehlung für zukünftige Projekte sollte der grundsätzliche Anspruch sein, ein gut gedämmtes Gebäude zu bauen, welches somit über seine Lebenszeit wenig Energie verbraucht.

1.3.6 Entwicklung von Nachnutzungsszenarien für Bauteile aus Ökobeton

Obwohl Beton eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren hat, werden viele Gebäude bereits nach wenigen Jahrzehnten unter Freisetzung der gebundenen grauen Energie abgerissen. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft erfordert die zirkuläre Bauweise eine Weiternutzung der in einem Gebäude verbauten Rohstoffe. Hierbei spielt der Umgang mit den Materialien eine große Rolle. Die Möglichkeiten reichen von der Abfallvermeidung über ein Re- oder Downcycling bis hin zur Vernichtung durch Deponierung. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verdeutlicht diese unterschiedlichen Stufen im Umgang mit unseren Ressourcen.

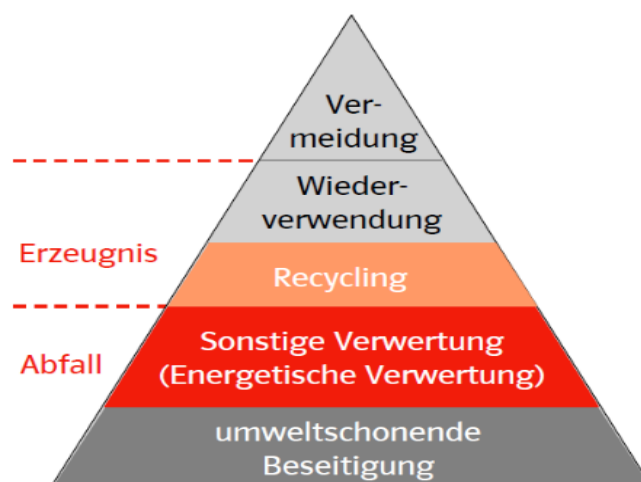


Abbildung 36 Hierarchie der Abfallwirtschaft nach []

Als wertvollste Stufe ist die Abfallvermeidung anzusehen, die durch Suffizienz, also das Weglassen von Bauteilen, oder durch eine direkte Wiederverwendung auf der gleichen

Einsatzebene erreicht werden kann. Eine weitere Form der Abfallvermeidung kann in der Resilienz eines Bauwerkes bestehen, hier gemeint als Weiternutzung, ggf. durch Anpassung oder Reparatur. In vielen Fällen geht die Wiederverwendung eines Materials allerdings mit der Umwandlung zu einem neuen Erzeugnis einher – hier ist ggf. zwischen einer gleichwertigen Nutzung (Stahlschrott wird wieder ein Stahlbauteil) oder einem Downcycling (Ein Betonbauteil wird zu Schotter) zu unterscheiden. Der ungünstigste Umgang ist schließlich die Betrachtung als Abfall, in der das Material energetisch verwertet wird, oder, wie hier euphemistisch formuliert, umweltschonend beseitigt, also deponiert wird.

Ziel der gesellschaftlichen Bemühungen muss es sein, die Materialien in den oberen drei Bereichen dieser Hierarchie zu belassen. Bei dieser Art des Wirtschaftens werden die Ressourcen aus dem sog. „anthropogenen Lager“ geschöpft, welches ein stetiges Wachstum erfährt. Gebildet und aufgebaut wird jenes durch Umlagerung von Rohstoffen aus der Bio- bzw. Geosphäre in das Lager der Anthroposphäre wobei es zu Infrastrukturen, Wohn- und Nichtwohngebäuden und Alltagsgütern transformiert wird.

Der Gedanke, das anthropogene Lager als „Mine“ zu betrachten, ist dabei keineswegs neu, sondern reicht bis in die römische Antike zurück, die anhand von Beispielen wie dem Konstantinbogen oder der Casa dei Crescenzi die Weiternutzung von zahlreichen Bauteilen aufzeigt.

Für Beton sind folgende Möglichkeiten der Nachnutzung denkbar:

- Direkte Wiederverwendung als konstruktives Bauteil (Decke, Wand, Stütze)
- Gebrochen/Zerkleinert als Zuschlag zu Recyclingbeton (Ersatz der Gesteinskörnung) für die Herstellung neuer Betonbauteile
- Gebrochen/Zerkleinert als Gesteinskörnung als Füllmaterial/ Schotter
- Weiternutzung durch die Kunst-/ Designszene (Möbelbau, Skulpturen, Einrichtung)

Bei der direkten Weiternutzung von Betonteilen erfolgt eine sachgerechte Demontage und eventuelle Aufbereitung. Werden die Teile nicht unmittelbar verbaut, können sie zwischengelagert werden. In der Praxis kann diese Maßnahme zum jetzigen Zeitpunkt kaum umgesetzt werden, da die Gesetzeslage und eventuelle Haftungen nicht ausgearbeitet und damit risikobehaftet sind. Da ein energieintensiver Recyclingprozess entfällt und der Beton keinen Wertverlust erfährt, stellt diese Art der Weiternutzung jedoch die ökologisch wertvollste Variante dar.

Im Rahmen von Forschungsvorhaben ist es jedoch schon möglich, sich mit dem Potential der direkten Weiterverwendung von Betonteilen zu beschäftigen. Das Structural Xploration Lab der École Polytechnique Fédérale Lausanne unter Corentin Fivet widmete sich so der Errichtung einer Fußgängerbrücke aus abgebrochenen Betonbauteilen einer Sanierung [26]. Bei dem umzubauenden Objekt handelte es sich um ein weniger als zehn Jahre altes Gebäude, aus dem das Abbruchunternehmen auf Anfrage des Forscherteams 25 Betonblöcke auf das notwendige Maß schnitt und bereits mit Bohrungen für die Spannkabel versah. Der Bau der eigentlichen Brücke erfolgte dann innerhalb von zwei Monaten unter Beteiligung von Ingenieuren, die die Belastungsfähigkeit der Struktur gewährleisteten, sodass die Brücke zunächst im Rahmen der Forschungsarbeit, später sogar als öffentliches Provisorium der Stadt Conthey im Kanton Wallis präsentiert wurde [26].



Abbildung 37

Auftrennen der Betonelemente zu einzelnen Segmenten [26]



Abbildung 38 Vorbereiten der Betonsegmente für der kleinen Fußgängerbrücke [26]



Abbildung 39 Probelauf über die fertige Brücke als studentisches Projekt [26]

Für diese Art des kreislauffähigen Bauens müssen die Voraussetzungen bereits bei der Gebäudeerrichtung geschaffen werden, indem Bauteilabmessungen so gestaltet sind, dass die Elemente flexibel wiederverwendet werden können. Großes Potential der direkten Wiederverwendung haben dabei Plattenbauteile oder ganze Elemente aus Decken, Wänden und Stützen. Voraussetzung der Demontage sind reversible Fügungstechniken, die das einfache Zerlegen einzelner Bauteile ermöglichen.

Im nächsten Schritt dreht sich dann der Entwurfsprozess um, indem nicht mehr das Material nach dem Entwurf gestaltet wird, sondern der Entwurf sich nach vorhandenem Material richtet. Ein Nachteil bei der Nachnutzung sind die bereits angesprochenen, oftmals unbekanntenen Bauteilqualitäten (Bewehrungsstärke, Betongüte, etc.) welche, selbst wenn eine Wiederverwendung beabsichtigt ist, aufgrund von Haftungsrisiken und Unsicherheiten letztendlich zu einer Neukonstruktion führen.

An dieser Stelle sollte der im September 2023 vom Deutschen Institut für Normung veröffentlichte Standard zum „Verfahren zur Erfassung von Bauprodukten als Grundlage für Bewertungen des Anschlussnutzungspotentials vor Abbruch- und Renovierungsarbeiten“ erwähnt werden. Diese neue DIN SPEC 91484 soll eine geregelte Vorgehensweise bei der Identifizierung und Dokumentation von Baumaterialien zur Weiterverwendung bieten. Bereitgestellt werden Informationen zum Bauort und -jahr sowie zur Nutzungsart, eventuelle Schadstoffbelastung oder die Unterschutzstellung durch die Denkmalbehörde [27].

Eine weitere Variante der Nachnutzung von Beton stellt das Recyclen des Materials dar. Aktuell wird ein Großteil des abgebrochenen Betons zerkleinert und im Straßen- und Erdbau eingesetzt. Von großem Interesse ist die Nutzung von Beton-Recyclat jedoch als Zuschlag für die notwendigen Betonbauteile. Kreislaufgerechtes Betonrecycling bedeutet nach dem aktuellen Stand der Technik, Abbruchbeton zu zerkleinern, zu klassieren und den gewonnen Betonsplitt als partiellen Ersatz für die Gesteinskörnung aus primärer Rohstoffquelle (Naturkies und Schotter) zu nutzen. Der Einsatz von Gesteinskörnung aus einer Beton-

Recycling-Quelle für Frischbeton lag in Deutschland zuletzt bei ca. 1,2 % [28] . Der Großteil des mineralischen Abbruchmaterials erfährt ein Downcycling in den Anwendungen im Straßenbau, als Füllmaterial oder Frostschutzschichten.

Um Beton-Rezyklat möglichst rohstoffeffizient nutzen zu können, verfolgt die Forschung das Ziel, die Betonmatrix in seine Bestandteile Zementstein und runden Kies zu zerlegen. Das Fraunhofer IBP hat hier unter Leitung von Dr. Volker Thome die elektrodynamische Fragmentierung weiterentwickelt. Hierbei werden ultrakurze Hochspannungsimpulse in das Gefüge gejagt, die den Altbeton an den Korngrenzen aufspalten. Das Verfahren ermöglicht eine sehr saubere Trennung der Bestandteile. Neben den fragmentierten Zuschlägen können so auch Kalk und Feinmehle gewonnen werden, die wieder der Zementindustrie zugeführt werden können [29]. Hiermit könnten dann sehr wohl wie in 1.3.1 beschrieben Portlandzementklinker substituiert werden, um einen nachhaltigeren Zement zu generieren. Nach Aussagen des Fraunhofer Institutes ist das Verfahren nicht energieintensiver als eine mechanische Aufbereitung und damit marktfähig [29].

Das bedeutet aber auch, dass die CO₂-Bilanz eines RC-Beton, der maßgeblich durch den konventionellen energieintensiven Zementanteil beeinflusst wird, nicht zwingend besser ausfällt, dafür jedoch primäre Rohstoffquellen geschont werden können. Seit 2023 existieren für RC-Betone sogar Datensätze in der Oekobau.dat, so dass eine Berechnung auch auf dieser Ebene möglich wird. Wie bereits in Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt liegt das GWP eines RC-Betones über dem eines konventionellen Betons gleicher Qualität (und noch einmal deutlich über dem des Ökobetones). RC-Betone sind ebenso leistungsfähig wie konventionelle Betone und bis zur Festigkeitsklasse C30/37 unter Einhaltung der gängigen Regelwerke (DIN 1045; DIN EN 12620; DIN 4226-101 usw.) zugelassen [30]. Es gibt aktuell keine Hinweise darauf, dass der hier verwendete Ökobeton am Ende seiner Lebenszeit nicht ebenfalls als Recyclat gebrochen und in einem neuen Betonbauteil verwertet werden kann.

Erfolgen die Maßnahmen des Abbrechens, Aufbereitens und Wiederverwendens lokal nah beieinander, lässt sich auch die Einsparung von Transportkosten sowie -emissionen und Deponiekosten als positiv hervorzuhebender Faktor des Recyclingprozesses anmerken.

Ein letztes Nachnutzungsszenario für Betonbauteile lässt sich in der Designszene finden. Kunst- und Kulturschaffende, die sich mit der Weiternutzung und Umgestaltung von Alltagsobjekten beschäftigen, hauchen ausgesonderten Materialien auf diesem Weg neues Leben ein und fordern damit zur Auseinandersetzung mit der vorherrschenden Wegwerfmentalität auf. So werden Glasflaschen in einen Wandaufbau integriert oder Kronkorken als Fliesenspiegel umgenutzt sowie Stoffreste zu Ziegeln gepresst und ganze Möbel aus wiederverwendetem Kunststoff sowie auch Beton hergestellt [31].



Abbildung 40 Sessel an der Strandpromenade von Barcelona (Foto: Design Pics / picture alliance) [31]

Dem besonderen Thema des Bauschutts haben sich die zwei Designerinnen Louisa Rubisch und Rasa Weber in ihrer Masterarbeit an der Universität der Künste Berlin unter Betreuung von Prof. Axel Kufus und Prof. Jozef Legrand angenommen. Als „Urban Terrazzo“ fertigen sie Plattenbauteile als Möbel aus aufbereitetem Abbruchmaterial. Angelehnt an die traditionelle Terrazzoherstellung werden dabei u.a. Beton- und Ziegelbruch mit Bindemitteln zu Platten gepresst, getrocknet und geschliffen und behalten dabei ihre inhärente Ästhetik des Gebrauchten. Rubisch und Weber vertreten dabei den Standpunkt „dass jedes Gebäude seine eigene Materialgeschichte in sich trägt, die es wert ist, erzählt zu werden.“ [32]

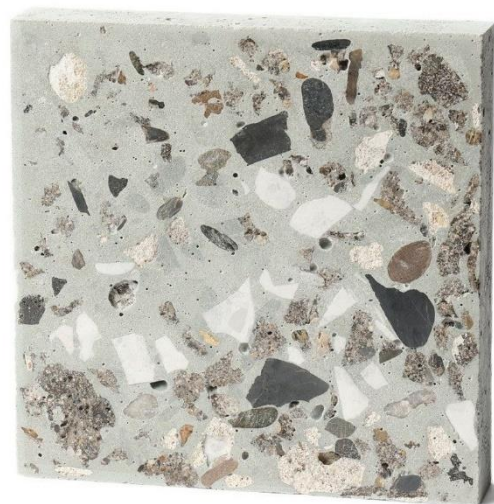


Abbildung 41 Plattenbauteile aus Abbruchmaterial [32]

Der kreative Umgang mit Betonbauteilen wird auch an der Hochschule Bochum erprobt. Hier experimentieren Studierende des 2. Fachsemesters mit der Verwendung des Baustoffs Beton zur Gestaltung von Leuchten. Ähnlich dem vorangegangenen Beispiel dürfen und sollen die Merkmale der Erstnutzung dabei sichtbar bleiben. Der einzigartige Charakter und Wert eines weitergenutzten Bauteils oder Materials steht damit im Vordergrund und soll die Teilnehmer des Moduls bereits in der frühen Phase des Studiums für das Thema des zirkulären Bauens sensibilisieren.



Abbildung 42 Beispiele zum kreativen Umgang mit Beton und Holz, teilweise in der Nachnutzung gebrauchter Elemente (Werke v. Fotos: Klara Bunzel)

Das Wieder- und Weiterverwenden von Bauteilen setzt ein Umdenken bezüglich allgemeiner Annahmen zu der Wertigkeit von neu und reproduzierten Gütern voraus. Die gesellschaftlich vorherrschende Maxime der Makellosigkeit und eine vermeintliche Fehlerhaftigkeit gebrauchter Waren stellen ein Hindernis bei der Etablierung einer zirkulären Wirtschaft dar, das es zu überwinden gilt. Der Gedanke der Umnutzung ganzer Gebäude, von Bauteilen oder Baustoffen reduziert sowohl die Rohstoffentnahme als auch die CO₂ Emissionen sowie das Abfallaufkommen und ist somit grundlegend für zukünftig funktionierende Gesellschaften. Nicht unerwähnt bleiben sollte die eigene Ästhetik, die einem wiederverwendeten Material oder Objekt innewohnt, seinen Charakter bestimmt und geschichtstragend die Identität ganzer Orte stiften kann. Nicht zuletzt ist die Vermittlung dieses Gedankens auch Aufgabe und Ziel des Freilichtmuseums.

1.4 Literaturverzeichnis Part HS BO

- [1] Prof. Dr. S. Schwickert et al., „Nachhaltiges Museum Detmold; Abschlussbericht zur 1.Stufe,“ Detmold, 2022.
- [2] J.Bauhus et al und Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik, „Gutachten des wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik,“ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin, 2021.

- [3] S. L. Baden-Württemberg, „Pro-Kopf CO₂-Emissionen 2022 bei rund 5,8 Tonnen,“ Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 27 04 2024. [Online]. Available: <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2024097>. [Zugriff am 30 05 2024].
- [4] BMEL, *Waldstrategie 2050*, Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2021.
- [5] J. Ruppert, *Dekarbonatisierung von Zement und Beton - Eine CO₂-Roadmap zur Klimaneutralität*, Düsseldorf: VdZ Technology gGmbH, 2021.
- [6] Baulinks, „Rückbaufähige Holz-Beton-Verbunddecke von Brüninghoff,“ BauSites GmbH, 21 10 2020. [Online]. Available: <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/1724.php4>. [Zugriff am 01 06 2024].
- [7] Z. Eder, „Eder Planziegeldecke,“ Ziegelwerk Eder, [Online]. Available: <https://www.eder.co.at/ziegelwerk/ziegeldecke>. [Zugriff am 01 06 2024].
- [8] L. Borgmann und Y. Seidler, *Beton aus Bakterien*, HS Bochum: Lehrgebiet Bauphysik und energieeffizientes Bauen, 2022.
- [9] J. Klimm, „Wie römischer Beton Risse von allein flickt,“ spektrum.de, 06 01 2023. [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/news/antike-wie-roemischer-beton-risse-von-allein-flickt/2095284>. [Zugriff am 31 05 2024].
- [10] Prof.Dr.-Ing. Frank Fingerloos et al., Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Beuth-Verlag, 2016-08.
- [11] D.-I. D. Bosold und D.-I. A. Grünewald, *Zement-Merkblatt Betontechnik B18*, Düsseldorf: InformationsZentrum Beton GmbH, 2020-02.
- [12] P. Mühlbauer, „Selbstreparierender Beton,“ telepolis, 13 09 2017. [Online]. Available: <https://www.telepolis.de/features/Selbstreparierender-Beton-3829644.html>. [Zugriff am 31 05 2024].
- [13] Prof. Simone Stürwald, „KLARK Klimaneutraler Beton,“ Ostschweizer Fachhochschule, 2021. [Online]. Available: <https://www.ost.ch/de/projekt/klark>. [Zugriff am 02 06 2024].
- [14] W. Wright, „Coffee offers performance boost for concrete,“ Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), 23 08 2023. [Online]. Available: <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2023/aug/coffee-concrete>. [Zugriff am 02 06 2024].
- [15] Bayerische Ingenieurkammer-Bau, „Zement: Neue Geschäftsmodelle für die CO₂-Mineralisierung,“ Bayerische Ingenieurkammer-Bau, 03 03 2022. [Online]. Available: https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2022-03-23_Zement-Neue-Geschaeftsmodelle-fuer-die-CO2-Mineralisierung.php. [Zugriff am 19 05 2024].
- [16] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz, „Erstmalige Zulassung zum Einsatz eines ressourcenschonenden und klimaverträglicheren Transportbetons in einem Bauvorhaben in Berlin,“ Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, 2022. [Online]. Available: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/projekte/rc-beton/transportbeton/>. [Zugriff am 03 06 2024].

- [17] Prof. Dr. T. Stengel und Prof. Dr. C. Gehlen, „Gutachten 21-153/1.3 ZiE Ökobeton Freilichtmuseum Detmold,“ München, 2022.
- [18] Prof. Dr.-Ing. D. Lowke, Prof. V. Huckemann und Dr.-Ing. HW Krauss, „Abschlussbericht zum Projekt "Nachhaltige Betone aus lokal verfügbaren Ausgangsstoffen",“ Braunschweig, 2022.
- [19] „CO2 reduzierte Zemente,“ HOLCIM Deutschland, Dez 2022. [Online]. Available: <https://www.holcim.de/co2-reduzierte-zemente>. [Zugriff am 25 05 2024].
- [20] P. D.-I. D. Lowke, P. V. Huckemann und D.-I. H. Krauss, „Zwischenbericht zum Projekt "Nachhaltige Betone aus lokal verfügbaren Ausgangsstoffen",“ Braunschweig, 2021.
- [21] Zukunft Gas GmbH, „Geologische Speicherung von CO2: Carbon Capture and Storage,“ [Online]. Available: <https://gas.info/carbon-management/carbon-capture-storage>. [Zugriff am 29 05 2024].
- [22] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „faq-ccs-ccu.pdf,“ 29 05 2024. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/faq-ccs-ccu.pdf>. [Zugriff am 30 05 2024].
- [23] D. Hochwarth, „Leichte Betondecke im 3D-Druck spart Beton, Stahl und CO2,“ VDI- Verlag; www.ingenieur.de, 28 06 2023. [Online]. Available: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/leichte-betondecke-im-3d-druck-spart-beton-stahl-und-co2/>. [Zugriff am 30 05 2024].
- [24] Ingenieurbüro Schiessl, Gehlen und Sodeikat, „3D-Druck Haus Beckum,“ Schiessl Gehlen Sodeikat, [Online]. Available: <https://ib-schiessl.de/projekte/3d-druck-haus-beckum>. [Zugriff am 30 05 2024].
- [25] M. Goldmann, „Urban Mining: Materialkataster für Gebäude,“ Deutsches Architektenblatt, 22 11 2022. [Online]. Available: <https://www.dabonline.de/2022/11/29/urban-mining-madaster-materialkataster-gebaeude-cradle-to-cradle-recycling/>. [Zugriff am 03 06 2024].
- [26] S. Perroud, „Bauen aus Beton – ohne zu Betonieren,“ École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 10 11 2021. [Online]. Available: <https://actu.epfl.ch/news/bauen-aus-beton-ohne-zu-betonieren/>. [Zugriff am 28 05 2024].
- [27] Concular GmbH, „DIN SPEC 91484 / Pre-Demolition-Audit,“ Concular GmbH, 2024. [Online]. Available: <https://concular.de/din-spec-91484-pre-demolition-audit/>. [Zugriff am 03 06 2024].
- [28] BNB, *Bewertungssystem NB für Büro und Verwaltungsgebäude, Technische Qualität*, B. d. Inneren und f. B. u. Heimat, Hrsg., Berlin: BMIBH, 2020.
- [29] F. IBP, „Elektrodynamische Fragmentierung: Mit »Blitzen« selektiv trennen anstatt nur zu zerkleinern,“ Fraunhofer GmbH, 02 06 2024. [Online]. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/mineralische-werkstoffe-baustoffrecycling/aufbereitungsverfahren/elektrodynamische-fragmentierung.html>. [Zugriff am 02 06 2024].

- [30] F. Knappe und et al., *Leitfaden zum Einsatz von R-Beton*, Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg, Sep. 2017.
- [31] K. Urban, „Tolle Idee- was wurde daraus: Recycelter Beton,“ Deutschlandfunk, 28 05 2019. [Online]. Available: <https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus-recycelter-beton-100.html>. [Zugriff am 31 05 2024].
- [32] A.-L. Rubisch und R. Weber, „They feed off buildings,“ Anna-Luisa Rubisch & Rasa Weber Gbr, 2021. [Online]. Available: <https://www.urbanterrazzo.com/>. [Zugriff am 31 05 2024].
- [33] EN15804, DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen– Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“, Berlin: Beuth-Verlag, 2020-03.
- [34] I. f. B. u. U. IBU, „<https://ibu-epd.com/epd-programm>,“ 2021. [Online]. Available: <https://ibu-epd.com/epd-programm>. [Zugriff am 17 03 2021].
- [35] BIBH, „www.nachhaltigesbauen.de,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen>. [Zugriff am 12 06 2020].
- [36] A. Hillebrand, P. Riegler-Floors, A. Rosen und J.-K. Seggewies, *Recycling-Atlas*, München: Detail Business Information GmbH , 2018.