

# **Abschlussbericht: Kurzfassung Arbeitspakete 1 bis 7**

**DBU-Projekt AZ 35442/02**

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

## **ECOsights – Nachhaltiges Museum Detmold**

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



2. Stufe: Entwicklung und Erprobung von architektonischen,  
technischen und didaktischen Einzelmaßnahmen (Entwicklungsphase)

## 1. Antragsteller und Kooperationspartner

Antragsteller:

Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL)

LWL-Bau- und Liegenschaftsbetrieb

Technischer Leiter:

Matthias Gundler

Warendorfer Straße 2, 48133 Münster

+49 (0)251 - 591 0 | [info@lwl.org](mailto:info@lwl.org)

und

LWL-Freilichtmuseum Detmold

Dr. Marie Luisa Allemeyer

Krummes Haus, 32760 Detmold

+49 (0)5231 - 706 0 | [lwl-freilichtmuseum-detmold@lwl.org](mailto:lwl-freilichtmuseum-detmold@lwl.org)



## 2. Kooperationspartner

**Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe (AG 1, 2, 3)**

*Institut für Wissenschaftsdialog*

Prof. Dr. Tobias Schmohl

Campusallee 12, 32657 Lemgo

[www.th-owl.de/iwd](http://www.th-owl.de/iwd)

*Future Energy – Institut für Energieforschung*

Prof.‘in Dr.-Ing. Susanne Schwickert (Bauklimatik, Bauphysik, Monitoring)

Prof. Dr. Johannes Üpping (Energiesysteme, Regenerative Energien, Monitoring)

Emilienstraße 45; 32756 Detmold

+49 (0)5231 769-6182 | [susanne.schwickert@th-owl.de](mailto:susanne.schwickert@th-owl.de)



#### **Hochschule Bochum (AG 4)**

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

Fachbereich Architektur

Lennershofstr. 140, 44801 Bochum

+49 (0)171-6142446 | [volker@v-huckemann.de](mailto:volker@v-huckemann.de)

**Hochschule Bochum**  
Bochum University  
of Applied Sciences 

#### **ACMS Architekten GmbH (AG 5)**

M.Sc. Architekt Simon Waigand

Friedrich-Ebert-Straße 55, 42103 Wuppertal

+40 (0)202 - 445 71 0 | [info@acms-architekten.de](mailto:info@acms-architekten.de)

**ACMS** 

#### **Technische Universität Darmstadt (AG 6)**

Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung & Bauphysik

Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichelmann

EI-Lissitzky-Str.1, 64287 Darmstadt

+49 (0)6151 16-755-00, [info@twe.tu-darmstadt.de](mailto:info@twe.tu-darmstadt.de)

 **TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT**

## Danksagung

An dieser Stelle möchten wir unseren Dank für das Vertrauen und die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) aussprechen. Die durch das Netzwerk der DBU entstehende Reichweite macht zuversichtlich, dass mit dem Forschungsprojekt ein Beitrag zum ressourcenschonenden und kreislaufgerechten Bauen geleistet werden kann.

Insbesondere gilt unser Dank allen Forschungsbeteiligten, die mit Ihrer Expertise, Motivation und Ideen das Projekt ermöglicht und zu einem wertvollen Beispiel für nachhaltiges, zeitgemäßes Bauen haben werden lassen:

- Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Köln  
Dipl.-Ing. Holger Seitz und Dipl.-Ing. Oliver Rosenkranz
- Thormählen + Peuckert – Beratende Ingenieure PartG mbB, Paderborn  
Dipl.-Ing. Roland Eisler und Dipl.-Ing. Sascha Lauterbach
- Engels Beratende Ingenieure PartG mbB, Detmold  
Dipl.-Ing. Kai Eue
- Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger, Prof. Dr.-Ing. Toralf Burkert und Dr.-Ing. Maik Erler
- Stadt Detmold, Detmold  
Thomas Lammering und Annegret Roye
- MFPA Leipzig GmbH, Laue bei Delitzsch  
Dipl.-Ing. Michael Juknat und Dipl.-Ing. (FH) Eik Dorn
- Bernhard Fechner Lehm- und Holzbau, Detmold  
Bernhard Fechner
- Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Oldenburg  
Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger und M.Sc. Murat Ince
- Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Detmold  
Prof. Dipl.-Ing. Jens-Uwe Schulz

- Hochschule für Musik, Detmold  
Prof. Dr.-Ing. Malte Kob
  
- mdw Universität für Musik und darstellende Kunst, Wien / Österreich  
Antonio Salieri Institut
  
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Schlins / Österreich  
Martin Rauch und Di Architekt Thomas Honermann
  
- conluto Vielfalt aus Lehm, Blomberg  
Jörg Meyer & Team
  
- holzius GmbH  
Herbert Niederfriniger & Team
  
- Garant Transportbeton GmbH & Co. KG  
Dipl.-Ing. Georg Heidrich
  
- Baugesellschaft PRIOR mbH  
Frank Paschen
  
- Terhalle Holzbau GmbH  
Daniel Terhaar

## Vorwort

Das durch die DBU bereits in der 1. Stufe (Analysephase) geförderte Forschungsprojekt soll der Entwicklung von architektonischen und bauklimatischen Maßnahmen zum Bau und Betrieb nachhaltiger Museen dienen und wird am Beispiel des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des LWL-Freilichtmuseums Detmold, Westfälisches Landesmuseum für Alltagskultur erforscht. Die Ergebnisse der 1. Stufe können einem separaten Forschungsbericht (PPN: 1797140531, Titel: *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; 1. Stufe: Wissenschaftliche Voruntersuchung und Parameterstudie zu architektonischen und technischen Einzelmaßnahmen*), der ebenfalls im Online-Katalog der Bibliothek der Deutschen Bundesstiftung Umwelt zu finden ist, entnommen werden.

Ziel der 2. Stufe (Entwicklungsphase) ist die Entwicklung und Erprobung von architektonischen, technischen und didaktischen Einzelmaßnahmen, die nach Abschluss des Bauvorhabens geprüft und getestet werden (Erprobungsphase). Der technische Fokus der ersten Förderphase wird in der zweiten Phase weitergeführt, vertieft und erstmals mit sozialwissenschaftlichen Maßnahmen zur nachhaltigen Wissensvermittlung ergänzt. Der technische Schwerpunkt liegt in der theoretischen und praktischen Erforschung und Optimierung des bauklimatischen und energetischen Potenzials (u.a. Lehm als Baustoff, metall- und leimfreien Holzverbindungen, Ressourcenschonung und Energiemanagement im Gebäude). Um den hohen didaktischen Ansprüchen im Bereich der Museumspädagogik für generationen- und bildungsschichtenübergreifende Besucherkreise auch weiterhin nachzukommen, wird in Kommunikationsprojekten zu ressourcenschonendem Bauen die Wissensvermittlung nachhaltig verfolgt. Die Vermittlung von sozialem, ökologischem und ökonomischem Wissen soll auch in der Gebäudegestaltung des Neubaus deutlich werden.

Im hier vorliegenden Kurzbericht werden die wichtigsten Erkenntnisse der einzelnen Arbeitspakete sowie Einführungen in die Forschungsthemen zusammenfassend dargestellt. Beigefügt sind die Forschungsberichte der einzelnen Arbeitspakete als Langfassungen, welche Beschreibungen und Erläuterungen zu allen durchgeführten Untersuchungen und Forschungsergebnissen der einzelnen Maßnahmen enthalten. Um ein umfassendes Verständnis der Forschung zu erhalten, wird empfohlen, die Langfassungen zu lesen.

Die Aufgaben der zweiten Projektphase werden von den Kooperationspartnern wahrgenommen. Inhaltlich lassen sich die Aufgaben in fünf Arbeitsgruppen Bauklimatik und Bauphysik - AG 1, Energiesysteme - AG 2, Museumspädagogik / Kulturvermittlung und Didaktik - AG 3, Ökobilanz - AG 4,

Architektur - AG 5, Holzbau - AG 6 einteilen. Es folgen sieben Arbeitspakete, die durch die Arbeitsgruppen bearbeitet werden:

- **Arbeitspaket 1:** Lehm als Baustoff  
Bearbeitung: Technische Hochschule Ostwestfalen (TH OWL) – AG 1  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-1*
  
- **Arbeitspaket 2:** Untersuchung der temperaturstabilisierenden Wirkung der Erdmasse  
Bearbeitung: Technische Hochschule Ostwestfalen (TH OWL) – AG 1  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-2*
  
- **Arbeitspaket 3:** Vorbereitung Energiemanagement  
Bearbeitung: Technische Hochschule Ostwestfalen (TH OWL) – AG 2  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-3*
  
- **Arbeitspaket 4:** Forschungsvorbereitende Maßnahmen und Implementationsplanung zur Kulturdidaktik  
Bearbeitung: Technische Hochschule Ostwestfalen (TH OWL) und LWL Freilichtmuseum Detmold – AG 3  
Dateiname:
  
- **Arbeitspaket 5:** 5.1 Fortführung Lebenszyklusanalyse / Ökobilanz, Einfluss der Regionalität (100 km-Radius) u. 5.2 Ökobeton  
Bearbeitung: Hochschule Bochum (BO) – AG 4  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-5.1-5.2*
  
- **Arbeitspaket 6:** Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm  
Bearbeitung: ACMS Architekten GmbH – AG 5  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-6*
  
- **Arbeitspaket 7:** Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Holz  
Bearbeitung: Technische Universität Darmstadt (TUDa) – AG 6  
*Dateiname: DBU-Abschlussbericht-AZ-35442\_02-Langfassung-Arbeitspaket-7*

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>Prolog .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Arbeitspaket 1: Lehm als Baustoff .....</b>	<b>15</b>
1.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 1 .....	15
1.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 1 .....	18
<b>2. Arbeitspaket 2: Untersuchung der temperaturstabilisierenden Wirkung der Erdmasse.....</b>	<b>19</b>
2.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 2 .....	19
2.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 2 .....	20
<b>3. Arbeitspaket 3: Vorbereitung Energiemanagement.....</b>	<b>21</b>
3.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 3 .....	21
3.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 3 .....	22
<b>4. Arbeitspaket 4: Forschungsvorbereitende Maßnahmen und Implementationsplanung zur Kulturdidaktik .....</b>	<b>23</b>
4.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 4 .....	23
4.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 4 .....	24
<b>5. Arbeitspaket 5.1: Fortführung Lebenszyklusanalyse / Ökobilanz, Einfluss der Regionalität (100 km-Radius) &amp; 5.2: Ökobeton .....</b>	<b>24</b>
5.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 5.1 & 5.2 .....	25
5.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 5.1 & 5.2 .....	31
<b>6. Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm .....</b>	<b>32</b>
6.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 6 .....	32
6.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 6 .....	34
<b>7. Arbeitspaket 7: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Holz .....</b>	<b>35</b>
7.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 7 .....	35
7.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 7 .....	37
<b>8. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>38</b>
<b>9. Veröffentlichungen .....</b>	<b>39</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gebäudeensemble.....	12
Abb. 2: Aufteilung in Nutzungseinheiten.....	13
Abb. 3: Vergleich der Baustoffe für das Modul A4 (GWP).....	26
Abb. 4: Gesamtbilanz der betrachteten Bauteile 2. Projektstufe.....	27
Abb. 5: Lage der in Frage kommenden Betonbauteile im Gebäude .....	28
Abb. 6: Vergleich GWP Total zwischen verschiedenen Betonvarianten mit Hohlkörpereinsätzen .....	29
Abb. 7: Vergleich des Einflusses der wesentlichen Baustoffe.....	29

## Prolog

### Ökologisches Bauen

Der Baubranche wird etwa 60% des Ressourcenverbrauchs des Landes zugeordnet<sup>1</sup>. Zudem ist die Bauindustrie für etwa 35% des Energieverbrauchs und einen großen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich<sup>2</sup>. 8% des weltweiten, anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist auf die Herstellung von Beton zurückzuführen<sup>3</sup>. Darüber hinaus verursacht die Bauindustrie rund 53% der deutschlandweit anfallenden Abfallstoffe<sup>4</sup>.

In der Vergangenheit konzentrierte sich nachhaltiges Bauen auf das Senken des Energieverbrauchs im Betrieb des Gebäudes. Durch optimierte Gebäudetechnik und Bauteile können sehr geringe Betriebsenergiebedarfe erreicht werden. Für eine ganzheitliche Reduzierung von schädlichen Umwelteinflüssen muss der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet werden. Insbesondere die grauen Emissionen, die bei der Herstellung des Gebäudes anfallen, nehmen einen immer größeren Anteil an der Gesamtbilanz ein.

### Museumsbauten im Allgemeinen

Aufgabe von Museen ist das Forschen, Vermitteln, Bewahren und Sammeln von Kulturgütern. Kulturgüter stellen das kulturelle Erbe der Menschheit dar und spiegeln die gesellschaftliche Entwicklung wider. Das Konservieren dieser Kulturgüter ist eine Investition für nachfolgende Generationen und daher von besonderem öffentlichem Interesse. Aufgrund dessen werden Museumsbauten für eine lange Nutzungsdauer konzipiert und weisen in der Regel einen hohen architektonischen, baukulturellen und städtebaulichen Wert auf.

Um konservatorischen, raumklimatischen und musealen Anforderungen der Ausstellungsstücke gerecht zu werden, bedarf es in der Regel eines umfangreichen Einsatzes von Gebäudetechnik (Lüften, Kühlen, Heizen und Beleuchtung), der in der Regel mit hohen Energieverbräuchen und Kosten verbunden ist.

Aufgrund von möglichst flexibel nutzbaren Räumen weist der Museumsbau hohe bauphysikalische und konstruktive Anforderungen auf. Vor allem betrifft dies die Belastbarkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit, um große Spannweiten zu erreichen. Bauphysikalische Eigenschaften der Gebäudekonstruktion unterstützen klimatische Anforderungen. In der Regel wird dies durch

<sup>1</sup> Vgl. Schwarzkopp, F., et al., S. 47

<sup>2</sup> Vgl. Sobek, W., S. 10 - 13

<sup>3</sup> Vgl. Beyond Zero Emissions, S. 7

<sup>4</sup> Vgl. Umweltbundesamt, S. 3

Massivbauweisen u.a. aus zementbasierten Baustoffen ermöglicht, die aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit auch zur Stabilisierung des Raumklimas beitragen. Eine Optimierung dieser konventionellen Bauweisen, welche mit einem hohen Energie- und Ressourcenverbrauch einhergehen, findet im Status quo der Museumsarchitektur im Wesentlichen nicht statt.

Aufgrund hoher baukonstruktiver und bauphysikalischer Anforderungen, einem hohen Material- und Energieeinsatz, einer überdurchschnittlichen Betriebsenergie auf der einen Seite sowie der öffentlichen Relevanz und der Funktion der Wissens- und Kulturvermittlung auf der anderen Seite, bietet der Museumbau ein großes Potenzial, die drängenden Klima- und Umweltthemen in das didaktische Konzept der Wissensvermittlung zu integrieren und eine Vorbildfunktion im nachhaltigen und effizienten Umgang mit Ressourcen einzunehmen.

#### Entwurf und Konstruktion des Freilichtmuseums Detmold

Wesentliche Aufgabe des Museumsneubaus ist die didaktische Vermittlung bauökologischer Zusammenhänge im historischen Kontext des Freilichtmuseums. Dabei bildet der 6.000 m<sup>2</sup> BGF umfassende Neubau eine Hülle für die historischen Ausstellungsobjekte und ein erlebbares Anschauungsobjekt für innovative, ökologische Baukultur zugleich. Das Museum bietet im Rahmen der „Museumspädagogik“ eine sozialwissenschaftliche Begleitung, innerhalb der Nachhaltigkeitsaspekte wie z.B. ressourcenschonendes Bauen, kontemporäre Baukultur, nachhaltiger Gebäudebetrieb, Nutzung von regionalen Baumaterialien und Umgang mit Ressourcen kommunizieren wird.

Das LWL-Freilichtmuseum in Detmold zeigt auf 90 Hektar insgesamt über 120 gebaute Zeitzeugen der westfälischen Baukultur. Traditionell wurde meist mit regionalen und nachwachsenden Rohstoffen gebaut. Anlass genug, für das neue Eingangs- und Ausstellungsgebäude konventionelle Baustoffwege zu verlassen. Der Neubau des LWL-Freilichtmuseums ist einer der ersten Museumsbauten mit einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitskonzept. Basis des CO<sub>2</sub>-neutral-bilanzierten Gebäudes für die Herstellungsphase ist die Wahl primärenergiearmer, recyclefähiger Baustoffe wie eine Tragstruktur aus Stampflehm mit lokaler Ressourcenverfügbarkeit, leim- und metallfrei verbundene Vollholzlamellenträger, eine zement- und damit CO<sub>2</sub>-reduzierte Betonrezeptur und die Verwendung von Baustroh als Wärmedämmstoff. Für die Optimierung der Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs erfolgt die Wärmeerzeugung über eine Wärmepumpe mittels Geothermie, die Zulufttemperierung wird durch eine adiabate Kühlung unterstützt. Das Niederschlagswasser wird gespeichert und beispielsweise in den WC-Anlagen als Brauchwasser wiederverwendet. Zur bilanziellen Deckung des gesamten Energiebedarfs des Gebäudes und einer Zusatzversorgung der gesamten Liegenschaft ist eine 400 kWp-große Photovoltaikanlage in das Dach integriert.

Das zweistufige, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Forschungsprojekt mit dem Titel "ECOSIGHTS – NACHHALTIGES MUSEUM DETMOLD" zur Entwicklung von architektonischen und bauklimatischen Maßnahmen zum Bau und Betrieb nachhaltiger Museen begleitet die Planung und Ausführung, da für viele der ökologischen Ansätze normative Grundlagen noch nicht vorliegen. Ein Ergebnis wird dabei ein Handlungskatalog sein, der innovative Maßnahmen aus den Fachdisziplinen Architektur, Bauphysik, Bauklimatik, Energiesysteme und nachhaltige Komponenten für den Gebäudebau - begleitend zur architektonischen und fachspezifischen Bauplanung - identifiziert, quantifiziert und bewertet. Zudem wird die höchste Bewertungsstufe der DGNB mit Platin-Zertifikat angestrebt.



Abb. 1: Gebäudeensemble

Quelle: LWL / Hesterbrink / Pölerl

## Entwurf

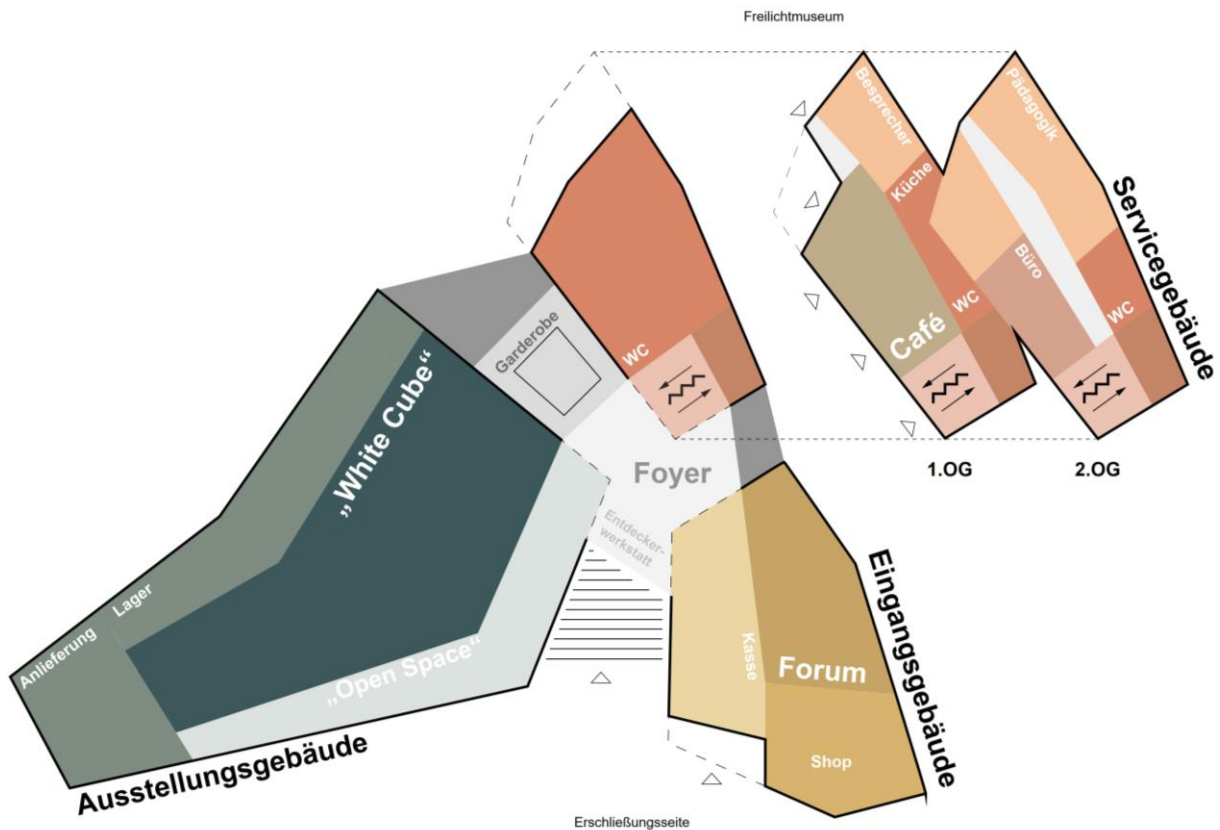
Der Siegerentwurf des 2018 entschiedenen Architektenwettbewerbs bildet den Übergang zwischen der öffentlichen Erschließungsseite und dem weitläufigen Gelände des Freilichtmuseums. Eine Freitreppe spielt zwischen den Gebäudekörpern mit der anspruchsvollen Topographie, sie bildet die Haupteinschließung zum Eingangsbereich des Freilichtmuseums. Die drei skulpturalen Baukörper leiten die Besucher:innen wie „Trittsteine“ auf das Museumsgelände und fügen sich dabei harmonisch in die Landschaft des Teutoburger Waldes ein. Die Höhen und polygonalen Dachformen der Baukörper folgen

spielerisch dem ansteigenden Gelände. Das zum Teil in die abfallende Topografie eingeschobene Erdgeschoss bildet den Sockel der drei aufgesetzten Baukörper.

### Funktionale Gliederung

Um die Gebäudestruktur zu optimieren, wird das Ensemble in verschiedene Baukörper und Zonen unterteilt, die zusammengehörige Anforderungen an die Nutzung, das Raumklima, den Tageslichtbedarf und die solaren Erträge aufweisen. Aus diesen strukturellen Gegebenheiten resultieren entsprechend der drei Gebäudekörper drei übergeordnete Nutzungseinheiten:

- Eingangsgebäude mit Versammlungsnutzungen und öffentlicher Infrastruktur
- Ausstellungsgebäude mit den wesentlichen konservatorischen Anforderungen
- Servicegebäude mit museumsbezogener Infrastruktur sowie pädagogischem und kulinarischem Angebot



### Erdgeschoss

Abb. 2: Aufteilung in Nutzungseinheiten

Quelle: ACMS Architekten GmbH

In stofflicher Interpretation historischer Fachwerkbauten bestehen die erdberührten Bauteile sowie das in die Topographie eingearbeitete Erdgeschoss aus mineralischen Baustoffen, im vorliegenden Fall aus Beton, welcher jedoch durch verschiedene Substitute wie Kalkstein- und Hüttensandmehl um 50% zementreduziert hergestellt ist und damit sowohl die CO<sub>2</sub>-Prozess- als auch die Brennstoffemissionen beim Herstellungsprozess um 40% reduziert werden konnten.

Die polygonale Dachstruktur der drei teils mehrgeschossigen Baukörper besteht aus einem materialsuffizienten Skelett-Tragsystem. Dabei wird lediglich Holz aus einer nachhaltigen, regionalen Waldbewirtschaftung eingesetzt. In Rückbesinnung auf traditionelle Bauweisen wird erforscht, wie das gegenwärtige Bauen mit Holz über den gesamten Lebenszyklus ressourcenoptimiert werden kann. Ziel ist es, die verwendeten Materialien und Bauteile am Ende der ersten des Lebenszyklus einer möglichst hochwertigen Nachnutzung zuzuführen. Dies kann durch klebstoff- und metallfreie, monomaterielle Holzbauteile gefördert werden. Traditionelle Zimmermannsverbindungen werden mit Hilfe digitaler Bautechnologien als einstoffliche Holz-Holz-Verbindungen mit CAD, CAM und CNC realisiert.

In den Holzgefachen der Gebäudehülle wird Baustroh als Dämmstoff eingesetzt. Als Abfallprodukt aus der Landwirtschaft kann dieses einer hochwertigen, langfristigen Nachnutzung zugeführt werden. Baustroh ist flächendeckend verfügbar, kann emissionsarm und technisch leicht als Baustoff eingesetzt werden und bietet dazu aufgrund der hohen Rohdichte große Potentiale für den nutzungstypologisch wichtigen sommerlichen Wärmeschutz.

Ein wesentlicher baustofflicher Fokus liegt auf den massiven, tragenden und in Wandlängsrichtung aussteifenden Innenwänden des Gebäudes. Dabei werden 60 cm starke, bis zu acht Meter hohe Wände aus monomateriellem Stampflehm zum einen in traditioneller Ortbauweise, zum anderen als großformatige, vor Ort vorgefertigte Elemente eingesetzt. Sowohl die ökologischen Potentiale des nahezu flächendeckend in Deutschland verfügbaren Rohstoffs, als auch die bauphysikalischen Materialeigenschaften spielen für die Errichtung und den Betrieb eine zentrale Rolle, die auch im weiteren Forschungsprojekt untersucht wurde. Dank seiner emissionsarmen Aufbereitung vom Rohstoff zum Baustoff, seiner Recyclingfähigkeit aufgrund der Monomaterialität und den hervorragenden wärme- und feuchtespeichernden Eigenschaften scheint das Material prädestiniert für die Verwendung in Museumsbauten.

## 1. Arbeitspaket 1: Lehm als Baustoff

### 1.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 1

An kleinformatischen Prüfkörpern aus Stampflehm wurden verschiedene Materialkennwerte anhand der Fertigmischung Stampflehm Grob der Firma Conluto in zwei Chargen untersucht und mit Vorgaben aus Regelwerken verglichen. Das aus den Versuchsreihen gemittelte Endschwindmaß der beiden Chargen 1,14% und 1,11 % liegt in den allgemeinen Vorgaben der Lehmbauregeln ( $\leq 2\%$ ) und ist damit eingehalten; die Vorgaben für Sichtbauteile ( $< 0,5\%$ ) sind nicht eingehalten. Die ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen ( $\mu$ ) der beiden geprüften Stampflehmchargen liegen mit 9 und 13,3 zum Teil im Bereich der in den Lehmbauregeln angegebenen Richtwerten von 5 bis 10. Die ermittelte Sorptionsisotherme (0 bis 95% relative Luftfeuchtigkeit) liegt unterhalb der bislang bekannten Werten aus der Materialdatenbank der Software Wufi für Lehm und Lehmputz sowie Messwerten der TU München. Die ermittelte Sorptionsisotherme weist im Vergleich durchgängig den niedrigsten Verlauf des Wassergehaltes entlang der steigenden relativen Luftfeuchte auf. Als Grund hierfür ist eine Variabilität der Art und des Anteils der im Stampflehm enthaltenen Tonminerale anzusehen.

Mithilfe mehrerer Raumklimasimulationen mit der Software Wufi Plus wurde das bauklimatische Potenzial des Stampflehms bzw. der aus nachhaltigen Baustoffen konstruierten Raumumschließungsflächen untersucht. Bei normalem Besucherverkehr und entsprechend konstanter Temperierung der Räumlichkeiten zeigt die Jahresübersicht der Raumluftfeuchte, dass sich die hygrischen Verhältnisse im Ausstellungsraum bei den berechneten Varianten stark unterscheiden: Obwohl beide Varianten aus Baustoffen bestehen, die eine sehr hohe Wärmespeicherfähigkeit besitzen, vornehmlich Beton bzw. Stampflehm, zeigt die nachhaltige Variante mit Stampflehm einen Verlauf, der deutlich geringere hygrische Schwankungen aufweist. Gleiches wird auch bei Betrachtung der Wochen- oder Tagesverläufe der Kälte- bzw. Hitzeperiode sichtbar.

Die Stampflehmwände im Museumsgebäude werden als tragendes Bauteil ausgeführt. Nach einer ausgedehnten Versuchsreihe im Labor wurde festgestellt, dass eine vollständige Belastung der Lehmwände mit dem geplanten Stahlbetonrähm erst erfolgen kann, wenn die Wände ihre Ausgleichsfeuchte erreicht haben. Die Simulationen zum Trocknungsverhalten der Stampflehmwände wurden begleitend mittels Wufi Pro 5.1 durchgeführt. Die Simulationssoftware bildet die Wechselwirkungen des Wärme- und Feuchtetransports unter freien Klimabedingungen auf Bauteilebene ab. Hierzu wurden verschiedenen Parameterstudien durchgeführt, die das Feuchteprofil über den Bauteilquerschnitt während des Trocknungsprozesses nachbilden. Die Studie zeigt, dass sich der gewünschte Feuchtegehalt von 1,1 bis 1,9 M-%, der zur Erlangung der erforderlichen Belastbarkeit der tragenden Wände erreicht werden muss, erst nach ca. 1,5 Jahren Trocknungszeit auf der Baustelle einstellt.

Um das thermisch-hygrische Potential des Baustoffes Lehm in idealer Weise am Objekt untersuchen zu können, ist ein Messkonzept entwickelt worden, welches die Temperatur und Feuchtigkeit des Bauteils über den gesamten Querschnitt erfasst. Die isolierte Betrachtung der Lehmwand reicht zur

Interpretation der Messdaten nicht aus, da der wesentliche bauphysikalische Vorteil von Lehm in seiner Pufferwirkung auf die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit der direkten Umgebung liegt. Daher soll die Systemgrenze der Lehmwand mindestens um die Temperatur und Luftfeuchtigkeit des umgebenen Innenraumes ergänzt werden, um Wechselwirkungen beider Systeme aufzuzeigen. Um das Leistungsvermögen des Lehms als funktionalen Baustoff weiter zu untersuchen, sind zusätzlich Informationen über technische Systeme wichtig, die diese Werte beeinflussen, wie Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK). Somit lassen sich die Erkenntnisse gleichzeitig für einen energieoptimierten Betrieb der HLK nutzen, um Nachhaltigkeit und Autarkiewerte im Betrieb des Gebäudes zu optimieren. Es sind insgesamt sechs Messstellen vorgesehen, fünf in der Ausstellung und eine weitere im Seminarraum. Jede Messstelle besteht dabei aus fünf über den Querschnitt der Lehmwand verteilten Feuchte-/Temperatursonden. Zur Integration der Sensordaten in die DDC kann das Modbus RTU Protokoll verwendet werden. Nach der Verbindung der Sensoren sind diese in der GLT softwareseitig hinzuzufügen. Ein Zugriff auf die Sensordaten kann mittels VPN oder regelmäßiger Zusendung der Messdaten in einer CSV-Datei erfolgen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Lehmoberflächen auch unter raumakustischen Gesichtspunkten messtechnisch untersucht und ihr Schallabsorptionsvermögen mit in der Baupraxis üblichen Materialien zu verglichen. Dazu wurden Messungen zur Ermittlung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade mittels Hallraum-Verfahren nach DIN EN ISO 354 von unterschiedlichen Lehmoberflächen durchgeführt. Durch die Messungen wurden neue Erkenntnisse im Bereich der raumakustischen Eigenschaften von Lehmoberflächen erlangt. In zwei aufeinanderfolgenden Messjahren wurden im Hallraum für eigens angefertigte Stampflehmwände bei Anwendung unterschiedlicher Fertigmischungen bewertete Schallabsorptionsgrade  $\alpha_W$  von 0,35 und 0,40 ermittelt und damit der Schallabsorberklasse D zugeordnet. Damit weist Stampflehm im Vergleich zu Planungswerten für Beton, Stuckgips oder Naturstein einen deutlich höheren Schallabsorptionsgrad auf. Die im gleichen Zuge untersuchten Lehmputze zeigten bewertete Schallabsorptionsgrade  $\alpha_W$  von 0,15 (entsprechend Schallabsorberklasse E) und damit einen etwa doppelt so hohen Absorptionsgrad wie z.B. Kalkzementputz. Bei der Betrachtung der Messergebnisse von Stampflehm und Lehmoberputz über die Zeit wurde festgestellt, dass das Schallabsorptionsvermögen mit Fortschreiten der Trocknung ansteigt. Die Zunahme des Schallabsorptionsgrades im Trocknungsverlauf lässt auf eine äußere und innere Strukturveränderung schließen. Wahrscheinlich ist, dass durch das Trocknen die Porosität ansteigt; die zu Beginn mit Wasser gefüllten Poren sind nach Trocknung am Schallabsorptionsvorgang beteiligt. Weiter kann auch die Veränderung der Oberfläche z.B. durch trockenungsbedingt entstandene Risse eine Rolle spielen. Eine weitere Feststellung ist, dass das Beschichten der Lehmoberflächen mit Lehmputzen (Lehmoberputz und Lehmfeinputz) ein Herabsetzen des Schallabsorptionsvermögens von Stampflehm bewirkt. Eine Erklärung für das Herabsetzen des Schallabsorptionsvermögens von Lehmoberflächen durch das Auftragen von Putzen beruht darauf, dass die zuvor vorhandene Porosität gegeben durch die inhomogene Oberflächenstruktur durch den Putz verschlossen wird. Für eine mit



Lehmfeinputz beschichtete Lehmbauplatte konnte ein bewerteter Schallabsorptionsgrad  $\alpha_W$  von 0,2 (Schallabsorberklasse E) ermittelt werden. Es könnte eventuellen Hohlräumen im Prüfaufbau infolge des empfindlichen Bruchverhaltens der aufgelagerten Platten ggf. geschuldet sein, dass der gemessene Schallabsorptionswert etwas höher ermittelt wurde als tatsächlich der Fall.

Weiter wurden Untersuchungen von Stampflehm mittels Impedanzrohr (Kundt'sches Rohr) nach DIN EN ISO 10534-1 unter Berücksichtigung der Oberflächenstruktur und der Materialfeuchte an zylindrischen Prüfkörpern mit 29 mm bzw. 99 mm Durchmesser durchgeführt. Anhand der Messergebnisse lassen sich Zusammenhänge zwischen den Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit, der Materialfeuchte und des Schallabsorptionsgrads für senkrechten Schalleinfall des Stampflehms erkennen. Die hiermit gefundenen Ergebnisse stützen und vertiefen die Erkenntnisse, die bei den Hallraumversuchen gewonnen werden konnten. Es kann festgehalten werden, dass mit Abnahme der Materialfeuchte und Zunahme der Oberflächenporen das Schallabsorptionsvermögen steigt. Die akustischen Untersuchungen an den Lehmoberflächen haben bewiesen, dass diese im Vergleich zu in der Baupraxis zweckentsprechend eingesetzten, konventionellen Materialien wie Beton oder Kalkzementputz ein signifikant höheres Schallabsorptionsvermögen aufweisen. Dieses vielversprechende Ergebnis deutet darauf hin, dass Stampflehm nicht nur als ökologisch nachhaltige Alternative in Bauprojekten betrachtet werden, sondern auch gezielt zur Verringerung von Nachhallzeiten in Räumen dienen kann – besonders wenn zugleich eine gute thermisch-hygrische Pufferwirkung erzielt und bewusst reduzierte gestalterische Mittel im Sinne eines minimalistischen Baustils eingesetzt werden sollen. Umgekehrt kann aufgrund der vergleichsweise guten schallabsorbierenden Eigenschaften des Lehms ggf. auf zusätzliche absorbierende Akustik-Verkleidungen verzichtet werden, das als Voraussetzung zur Nutzung der thermisch-hygrischen Pufferwirkung des Lehms betrachtet werden muss.

Um die baulichen Besonderheiten des Nachhaltigen Museums Detmold bezüglich seiner klimatischen, energetischen, raumakustischen und ökobilanziellen Vorzüge an die Besuchenden transferieren zu können, wurden zur Unterstützung des museumsdidaktischen Teams Ideen zu Stationen innerhalb der Dauerausstellung entwickelt. Diese thematisieren die Baustoffe Ökobeton, Holz, Lehm und Stroh. Fachliche Texte für Informations- und Erläuterungstafeln ergänzen dies und dienen den Museumspädagogen als Unterstützung bei der Planung und Umsetzung der Ausstellung.

## 1.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 1

Arbeitspaket 1 adressiert Lehm als Baustoff mit verschiedenen bauphysikalischen und bauklimatischen Aspekten. Der Forschungsschwerpunkt lag auf der Untersuchung des Potenzials, den Lehm und Lehmbaustoffe als historisch-modernes Material für den modernen (Museums-)Bau bietet. Lehm wird seit rund 20 Jahren wieder vermehrt in Wohn- und Nichtwohngebäuden eingesetzt, zumeist auf Antrieb von Bauherrschaft und Planenden hin, die alternative, ökologische Bauphilosophien verfolgen. Als Vorteile von Lehm werden Regionalität, Rezyklierbarkeit und Schadstofffreiheit, vor allem aber seine raumklimastabilisierende Wirkung angesehen. Die Pufferwirkung von Lehm ist in der Literatur vielbesprochen, dabei allerdings noch weitgehend unkonkret und unzureichend erforscht.

Der Neubau des Ausstellungsgebäudes des Freilichtmuseums Detmold bot nun die hervorragende Möglichkeit, die thermisch-hygrischen Verhältnisse in und an Lehmbauteilen vor dem Hintergrund der hohen raumklimatischen Relevanz von (klimatisch) unterschiedlich betriebenen Ausstellungsräumen simulatorisch zu untersuchen. Darüber hinaus bietet dies die besondere Gelegenheit, nach Fertigstellung die Simulationsergebnisse messtechnisch zu validieren. Ziel war es, fehlende bauphysikalische, materialtechnische Zusammenhänge zu erarbeiten, die mehr Planungssicherheit bei Wohnungs- und Büroprojekten geben, und somit die zukünftige Verwendung des historischen Baustoffs Lehm maßgeblich zu fördern. Besonders relevant sind die feuchtetechnischen Kennwerte hinsichtlich des Trocknungsverhaltens bzw. Schwindens der gewaltigen tragenden Lehmbauteile gerade für das Holztragwerk des Museums.

Obwohl Lehm als ein Baumaterial gilt, welches gute raumakustische Eigenschaften und ein hohes Schallabsorptionsvermögen aufweist, liegen nur wenige quantitative Forschungsergebnisse vor, die diese Aussage stützen. Diese wenigen bringen zudem keine direkten Erkenntnisse zu Schallabsorptionseigenschaften von klassischen Stampflehmwänden und Lehmputzen, wie sie im Neubau zum Einsatz kommen. Für schadensfreie, komfortable Räume sind belastbare akustische Messergebnisse in der Fachplanung jedoch dringend erforderlich, wenn der Einsatz von Lehm als Baustoff jenseits des Wohngebäudebereichs deutlich ausgeweitet werden soll.

## **2. Arbeitspaket 2: Untersuchung der temperaturstabilisierenden Wirkung der Erdmasse**

### **2.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 2**

Verschiedene dynamische Parameterstudien am Ein- und Mehrzonenmodell mit der Software VOLTRA haben bestätigt, dass durch die Dämmung der Bodenplatte gegenüber dem Erdreich der Einfluss der Außentemperatur auf die Innenraumtemperatur steigt. Bei vollflächig gedämmter Bodenplatte ergeben sich im Jahresverlauf größere Schwankungen der Innentemperatur im unconditionierten Gebäude als bei horizontaler bzw. vertikaler Randdämmung.

Die Speicherfähigkeit des Erdreichs unterhalb der großen Bodenplatte des geplanten Gebäudes dämpft den Einfluss der Außentemperatur auf die Innenraumtemperatur, sodass die jährliche Schwankung der Innenraumtemperatur geringer ausfällt. In Bezug auf die angestrebte Nutzung des Gebäudes als Ausstellungsraum innerhalb eines Museumsgebäudes ist eine geringe Schwankung der Innenraumtemperatur von Vorteil. Die Dämpfung des Temperaturverlaufs resultiert aus der Phasenverschiebung der Temperatur im Erdreich unterhalb der Bodenplatte. Teilweise sind Anforderungen der Kategorie A1 nach ASHRAE im unconditionierten Gebäude bei vollflächiger Wärmedämmung des unteren Gebäudeabschlusses nicht erfüllt.

Kriterien der menschlichen Behaglichkeit außer Acht gelassen, lässt sich feststellen, dass für die sichere, klimastabile Ausstellung und Aufbewahrung der Archivalien ein Gebäudeentwurf ohne vollflächige Wärmedämmung des unteren Gebäudeabschlusses besser geeignet ist, da Temperaturschwankungen sowohl über einen kurzen Betrachtungszeitraum, wie z.B. einen Tag, wie auch über einen längeren Zeitraum, wie z.B. eine Saison, mit Erdkontakt geringer ausfallen.

Da im vorliegenden Planungsstand jedoch eine Fußbodenheizung zum Einsatz kommt, kann unterstellt werden, dass – nun natürlich unter Aufwendung entsprechender Energiemengen für die Raumtemperierung mittels Fußbodenheizung und sonstiger Klimatisierung – ebenfalls hohe Ansprüche an die Klimakonstanz im Gebäudebetrieb erfüllt werden können.

## 2.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 2

Die temperaturstabilisierende Wirkung der Erdmasse ist Gegenstand der Untersuchungen in Arbeitspaket 2. Hervorragender Wärmeschutz und große Masse sind Voraussetzungen für möglichst klimakonstante Gebäude. Die Größe und Kompaktheit des geplanten Gebäudes sowie die Hanglage bieten ideale Voraussetzungen, die raumklimastabilisierende Wirkung des Erdreichs zu erforschen, so sollten theoretisch wie auch messtechnisch die Temperaturverhältnisse und die Wärmeströme im Erdreich untersucht werden. Hiermit sollte der Frage nach einem primärenergetisch sinnvollen Einsatz von Dämmstoffen im erdberührten Bereich gerade vor dem Hintergrund der geforderten Klimakonstanz im Gebäude nachgegangen werden.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass durch ein hohes Maß an Kompaktheit, ein hohes Maß an Erdkontakt mit lediglich im Randbereich gedämmten erdberührten Bauteilen, ein hohes wärmeschutztechnisches Niveau der Gebäudehülle gegen Außenluft, nordorientierte Verglasungsflächen, Innenbauteile in sehr schwerer Bauweise sowie Vorschalten einer voluminösen Pufferzone ein Museumsbetrieb im normalen Modus (d.h. ohne nennenswerten Besucherspitzenzeiten) ohne jegliche Art von Beheizung oder Kühlung und bei Lüftung mit unkonditionierter Außenluft möglich ist. Dabei kann die Einhaltung der Klimabedingungen nach ASHRAE Kategorie A1 mit den dort definierten Kriterien an Kurz- und Langzeitschwankungen bezüglich der sich gänzlich frei einstellenden Innentemperaturen vollends erfüllt werden.

Im Zuge der Gebäudeplanung wurde von Bauherrschaft und Planenden die Entscheidung getroffen, statt einer Wandtemperierung eine Flächenheizung im Fußbodenaufbau vorzusehen. Damit ist die Empfehlung, die Bodenfläche auf großen Teilen wenig oder ungedämmt zu belassen, um möglichst großen Kontakt des Baukörpers zur thermischen Speichermasse des Erdreichs herzustellen, obsolet. Im Gegenteil ist jetzt eine Wärmedämmung unterhalb der Ebene der Fußbodenheizung angezeigt, damit die im Bodenaufbau eingebrachte Heizwärme nicht direkt ins Erdreich geleitet wird. Die differenzierte Betrachtung der optimalen Wärmedämmschichtdicke und -lage sowie die Messung der unter der Bodenplatte vorherrschenden Temperaturen ist darum zugunsten anderer Betrachtungen in Arbeitspaket 1 unterblieben. Die Hauptfragstellung richtete sich in diesem Kapitel nach einem primärenergetisch sinnvollen Einsatz von Dämmstoffen im erdberührten Bereich – vor dem Hintergrund der geforderten Klimakonstanz in Museumsgebäuden.

### **3. Arbeitspaket 3: Vorbereitung Energiemanagement**

#### **3.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 3**

Dieses Arbeitspaket des Forschungsprojekts beschäftigt sich hauptsächlich mit der Vorbereitung eines möglichen komplexen Energiemanagementsystems im realisierten Museumsgebäude. Dabei geht es im Detail um die Auswahl von Komponenten und die Sicherstellung der Kompatibilität von Schnittstellen zwischen der Gebäudeleittechnik und dem möglichen Energiemanagementsystem.

Des Weiteren wurden im Arbeitspaket Messungen durchgeführt, um die CO<sub>2</sub> Emissionen basierend auf dem Baustromverbrauch zu bestimmen.

Im Ergebnis wurde mit dem TQ EM 420 ein verfügbares und vielfältig einsetzbares Smart Meter ausgewählt, das für die Messungen an unterschiedlichen Stellen im Gebäude eingesetzt werden kann. Als Schnittstellen wurden mit BACnet und Modbus zwei gut geeignete identifiziert, welche sich hierbei final durchsetzen wird, kann jedoch erst bei einer Implantierung des Energiemanagementsystems entschieden werden. Beide Schnittstellen erfüllen alle Anforderungen und werden von der Gebäudeleittechnik unterstützt.

Die Baustrommessung im Feld zeigt an verschiedenen Stellen unterschiedliche Probleme, die letztendlich aber behoben werden konnten und zu einer längeren Messdatenreihe von Jan23 bis Okt23 führten. In diesem Zeitraum wurden durch den Baustrom CO<sub>2</sub> Äquivalente von ~21,5 to. verursacht.

### 3.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 3

Ein komplexes Energiemanagementsystem ist ein integraler Bestandteil moderner Energiesysteme, das zur Optimierung der Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung in verschiedenen Sektoren wie eingesetzt wird. Die Hauptziele eines EMS sind die Verbesserung der Energieeffizienz, die Reduzierung von Betriebskosten und die Minimierung von Umweltauswirkungen durch eine effiziente Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Dabei sind die Kernkomponenten die Erfassung und Messung von relevanten Größen, wie beispielsweise Energieflüssen. Die anschließende Analyse der Daten und eine Prognose für die nahe Zukunft, basierend drauf werden dann Simulationen für das zukünftige physikalische Verhalten des Gebäudes durchgeführt und letztendlich die GTL bzw. die Anlagen so angesteuert, dass das gesetzte Optimierungsziel möglichst erreicht wird.

Ein komplexes Energiemanagementsystem ist entscheidend für die Optimierung moderner Energiesysteme. Durch die Kombination von Echtzeit-Datenüberwachung, fortschrittlicher Datenanalyse und intelligenten Steuerungsmechanismen trägt es maßgeblich zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Förderung nachhaltiger Energiepraktiken bei.

## 4. Arbeitspaket 4: Forschungsvorbereitende Maßnahmen und Implementationsplanung zur Kulturdidaktik

### 4.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 4

Das Hauptziel von Arbeitspaket 4 war die Schaffung von Bildungsangeboten, die nachhaltige Themen aufgreifen und für Besucher aller Altersgruppen zugänglich machen. Durch den Einsatz von modernen Technologien und interaktiven Lernansätzen sollte das Bewusstsein für Umweltthemen und nachhaltiges Bauen gefördert werden.

Die in Arbeitspaket 4 entwickelten Konzepte wurden durch Fachleute positiv bewertet und sind bereit für die Implementierung, sobald das Bauvorhaben abgeschlossen ist. Erwartet wird, dass diese neuen Ansätze zu einer erhöhten Interaktion und einem umfassenderen Verständnis für nachhaltige Praktiken unter den künftigen Museumsbesuchern führen werden.

Die wichtigsten Forschungsergebnisse umfassen:

1. **Interaktive Technologien:** Die Einführung von Technologien wie Augmented Reality (AR) und interaktiven Displays hat die Möglichkeiten für Besucher, aktiv mit Ausstellungen zu interagieren und nachhaltige Themen tiefergehender zu verstehen, maßgeblich erweitert.
2. **Gamification:** Durch spielerische Elemente in den Ausstellungen konnte das Engagement der Besucher gesteigert und das Lernen gefördert werden.
3. **Workshops und Seminare:** Praktische, interaktive Bildungsangebote ermöglichen es den Besuchern, direkt in die Thematik eingebunden zu werden und Wissen aktiv zu konstruieren.
4. **Storytelling und digitale Narration:** Durch ansprechende Geschichten, die in digitale Erzählformate integriert wurden, konnte eine persönliche Verbindung zum Lernstoff hergestellt werden.
5. **Soziale Inklusion und Bildung:** Das Projekt wird dazu beitragen, Bildungsangebote so zu gestalten, dass sie verschiedene gesellschaftliche Gruppen ansprechen und einschließen.

Zusätzlich zu diesen didaktischen, neuen Ideen zeigte das Projekt in seinem Verlauf mit den in den Themenjahren «museum under construction» getesteten Methoden wie Reallaboren und dem «Digitalen Zwilling», wie das Freilichtmuseum Detmold durch die Errichtung des nachhaltigen Eingangs- und Ausstellungsgebäudes und das Freigelände sowohl lokale als auch globale Bildungsdynamiken miteinander verbinden kann. So kann es auch in Zukunft als lebendiger Lernort fungieren. Das Projektteam aus IWD und Freilichtmuseum verfolgte dabei einen Ansatz, der nicht nur Wissen vermittelt, sondern auch die Entwicklung starker individueller und kollektiver Identitäten unterstützt.

#### 4.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 4

Museumsdidaktik befasst sich mit der Vermittlung zwischen den musealen Sammlungen und der Öffentlichkeit. Ihr Hauptziel ist es, Besuchern Wissen über kulturelles Erbe auf anschauliche und interaktive Weise zu vermitteln. Dies schließt die Entwicklung von Bildungsprogrammen, Führungen, Workshops und anderen Aktivitäten ein, die dazu beitragen, die Ausstellungsstücke sowohl intellektuell als auch emotional erfahrbar zu machen. In der Museumsdidaktik spielen Objekte eine zentrale Rolle, da sie als physische Zeugnisse der Geschichte direkt mit den Besuchern kommunizieren können. Sie sind nicht nur Stellvertreter vergangener Epochen, sondern auch aktive Elemente im Lernprozess. Der sinnliche Umgang mit diesen Objekten ermöglicht es den Besuchern, eine direkte Verbindung zur Geschichte zu knüpfen und kulturelles Erbe aus einer persönlichen Perspektive zu begreifen.

Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Förderung der kulturellen Integration. Museen sind nicht nur Bewahrer der Geschichte, sondern auch moderne Begegnungsstätten, die verschiedene kulturelle Identitäten und Perspektiven zusammenbringen können. Durch zielgerichtete Bildungsangebote und Veranstaltungen, die auf die Vielfalt der Besucher eingehen, können Museen aktiv zur kulturellen Verständigung beitragen. Eine zentrale Herausforderung für das hier referierte Arbeitspaket ist die Schaffung von Bildungserlebnissen, die sowohl nachhaltig als auch inklusiv sind. Die neu entwickelten Lehrmethoden und Ausstellungsdesigns, die während des Projekts ECOSights eingeführt wurden, zielen darauf ab, diese Herausforderungen zu meistern. Sie bieten den Besuchern nicht nur Wissen, sondern fördern auch aktive Teilnahme und kritische Reflexion über nachhaltige Themen.

Somit ist die zentrale Herausforderung die Gestaltung eines Museumserlebnisses, das sowohl informativ als auch inklusiv ist. Die Museumsdidaktik muss sich vor diesem Hintergrund kontinuierlich weiterentwickeln, um auf Veränderungen in der Gesellschaft und in der Besucherstruktur reagieren zu können. Technologische Entwicklungen bieten neue Möglichkeiten der Vermittlung, wie z.B. digitale Führungen oder interaktive Ausstellungen, die es ermöglichen, eine breitere Zielgruppe anzusprechen und das Lernerlebnis zu vertiefen.

Die Rolle des Freilichtmuseums Detmold als Bildungs- und Lernort wird sich bei Inbetriebnahme des Gebäudes signifikant erweitern: Das Museum soll sowohl ein Ort der historischen Darstellung sein, aber auch die aktive gesellschaftliche Teilhabe im Bildungssektor fördern und neue Wege in der Vermittlung von Wissen und Kultur aufzeigen. Durch den Einbezug interaktiver Technologien und partizipativer Lehrmethoden wird eine Auseinandersetzung mit Nachhaltigkeit und kultureller Bildung in der Region gestärkt.



## **5. Arbeitspaket 5.1: Fortführung Lebenszyklusanalyse / Ökobilanz, Einfluss der Regionalität (100 km-Radius) & 5.2: Ökobeton**

### **5.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 5.1 & 5.2**

Arbeitspaket 5.1: Fortsetzung der Ökobilanz, Betrachtung der Regionalität

Im Rahmen des Bauvorhabens stehen die spezifischen Baustoffe Holz, Beton und Lehm im Fokus.

Das Holz für die Tragstruktur des Gebäudes wurde überwiegend/ von zwei Firmen geliefert: Beide Holzverarbeitungsfirmen, Holzius und Mayr Melnhof, beziehen ihr Holz von holzerzeugenden Forstbetrieben. Diese sind geografisch weit verteilt und erstrecken sich über die deutschen Staatsgrenzen hinaus. Die Notwendigkeit, Schnittholz aus nicht-regionalen Quellen zu beziehen, ergibt sich hierbei aus mehreren Gründen. Angesichts von Herausforderungen wie Dürre, Borkenkäfer oder Starkwindereignissen steht nicht genug heimisches Holz zur Verfügung. Deswegen muss die Holzindustrie oft auf Holz aus weiter entfernten Regionen zurückgreifen, um die Nachfrage zu decken und die Kontinuität der Produktion zu gewährleisten.

Der Beton wurde ausschließlich von der Fa. Garant geliefert. Dabei handelt es sich um Transportbeton in zwei Rezepturen. Recycling- und die im Vorfeld dieser Arbeit entwickelte Rezeptur zu Ökobeton die über eine Zulassung im Einzelfall für das Bauprojekt genehmigt wurde.

Eine Besonderheit des Gebäudes sind die großen tragenden Stampflehmwände zwischen Ausstellungsraum und Depot sowie dem Forum, die architektonisch das Foyer und die Ausstellung betonen. Der Stampflehm stammt von der ebenfalls in Detmold ansässigen Firma Conluto. Der für die Herstellung verwendete Lehm kann dabei jedoch aus unterschiedlichen Quellen stammen, für den Neubau des FLM Detmold, überwiegend aus der Baugrube vom Neubau eines Firmengebäudes für Phoenix Contact in Blomberg (tel. Auskunft Fa. Conluto). Im vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass diese Transporte über das Modul A2 ausreichend berücksichtigt sind. Der Transport auf die Baustelle wurde in diesem Fall individuell berechnet.

Beim direkten Vergleich der drei Baustoffe Holz, Beton und Lehm zeigt sich, dass der Transport von Holz die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Trotz der geringeren Gesamtmasse (ca. 523 Tonnen) im Vergleich zu Beton (7.579 Tonnen) und Lehm (1.506 Tonnen) führt die geringe Rohdichte von Holz (ca. 500 kg/m<sup>3</sup>) führen die hohen Entfernungen zu dem höchsten GWP- Wert im Bauteilvergleich. Somit lässt sich feststellen das Holz trotz seiner positiven Eigenschaften als nachhaltiger Baustoff im Bereich des Transports erhebliche Nachteile aufweist.

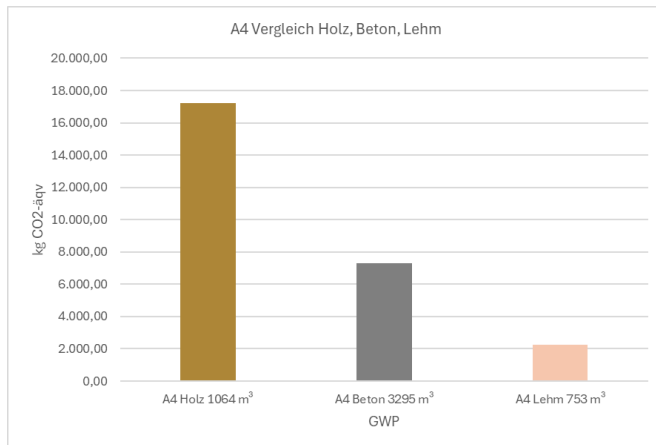


Abb. 3: Vergleich der Baustoffe für das Modul A4 (GWP)

Der rechnerische Ansatz der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonnenkilometer wurde im Projekt nicht hinterfragt, obwohl davon auszugehen ist, dass für Holz mit einer geringeren Rohdichte und so mit größerem Volumen anteilig mehr Lkw Fahrten vorzunehmen sind. Schlussfolgernd sind die A4-Werte aus den EPD-Datensätzen aus der Ökobau.dat wenig repräsentativ für tatsächliche Transportwege und die dabei freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daher sollte über das Einbeziehen von Lieferscheinen und anderer Methoden der Transportweg von Baustoffen zur Baustelle bei zukünftigen Bauvorhaben, individuell analysiert und in die Berechnungen der Ökobilanz einbezogen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass nur bei etwa 17 von 27 verwendeten EPDs Werte zum Modul A4 vorliegen, fällt der Einfluss des Moduls A4 auf die Gesamtökobilanz gering aus. Dennoch macht A4 aktuell bei der CO<sub>2</sub>-Bilanz 7% der Gesamtemissionen aus. Da die finalen A4-Werte für Baustoffe wie Bewehrungsstahl mit über 18 verschiedenen Zulieferern nicht ermittelt werden konnten, ist davon auszugehen das der reale A4-Wert deutlich höher ausfällt. Das verdeutlicht abermals die Bedeutung von Transportwegen der Baustoffe zur Baustelle und deren Einsparpotenzial durch die Verkürzung der Transportwege und gezielter Einbeziehung von regional hergestellten Baustoffen.

In Summe beläuft sich der Bilanzwert der hier betrachteten wesentlichen Bauteile für das GWP-Potential auf 362t CO<sub>2</sub>-äqv. und damit bei einer Betrachtung über 50 Jahre auf ca. 1,4 kg/m<sup>2</sup>a NGF. Durch die Energieversorgung kommen noch etwa 7 kg/m<sup>2</sup>a hinzu. In Summe liegt der GWP-Wert deutlich unter 25kg/m<sup>2</sup>a, was einem guten QNG -Standard entspricht. Dies wird durch das DGNB-Audit, welches zum Berichtszeitpunkt vorlag, bestätigt, auch wenn dort eine umfassendere Bilanz vorgenommen wurde und negative Emissionen für einen überschüssigen PV-Ertrag angesetzt wurden. Die Ergebnisse des Audits sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen und werden erst zur Fertigstellung des Gebäudes vorliegen.

In der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass für die Herstellung der Anteil der erneuerbaren Energien knapp überwiegt, und die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des hohen Holzanteiles sehr niedrig ausfallen. In Verbindung mit dem Gebäudeeigenen PV-Strom und einer Gutschrift über die Einspeisung ins öffentliche Netz kann so am Ende sogar wieder ein CO<sub>2</sub>-negatives Gebäude entstehen.

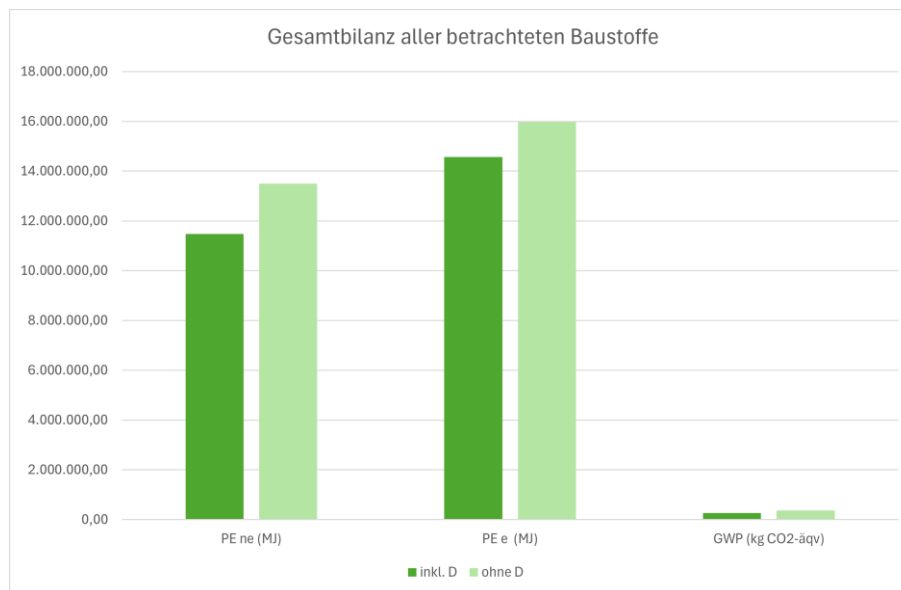


Abb. 4: Gesamtbilanz der betrachteten Bauteile 2. Projektstufe

#### Arbeitspaket 5.2: Ökobeton

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 Betons im Vergleich zu den anderen vorgeschlagenen Baustoffen (Holz, Lehm, Stroh) einen großen Einfluss auf das Ergebnis der ökologischen Bilanzen haben. Mögliche Ansätze zu CO<sub>2</sub>-neutraleren Zementen sind:

- Substitution von Zementklinker durch Feinstoffe in der Rezeptur
- Dekarbonisierung der Produktion durch Carbon Capturing (CCS und CCU)
- Zugabe biogener Stoffe zum Bindemittel
- Nutzung erneuerbarer Energien bei der Zementproduktion

In Absprache mit der Bauherrenschaft, den zukünftigen Nutzern, der fördernden DBU und den planenden Architekten wurde für einen weniger klimaschädlichen Beton der Ansatz der Substitution und der konstruktiven Massenreduktion gewählt, um das gesetzte Ziel maximal minimierter GWP-Emissionen zu erreichen. Zusätzlich wurden auch Zuschläge aus recyceltem 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.

Entsprechend wurden verschiedene Zementhersteller und Betonwerke angesprochen, ob sie sich in der Lage sehen, für das Bauvorhaben Freilichtmuseum Detmold konkret einen CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> reduzierten Betons unterstützen konnten.

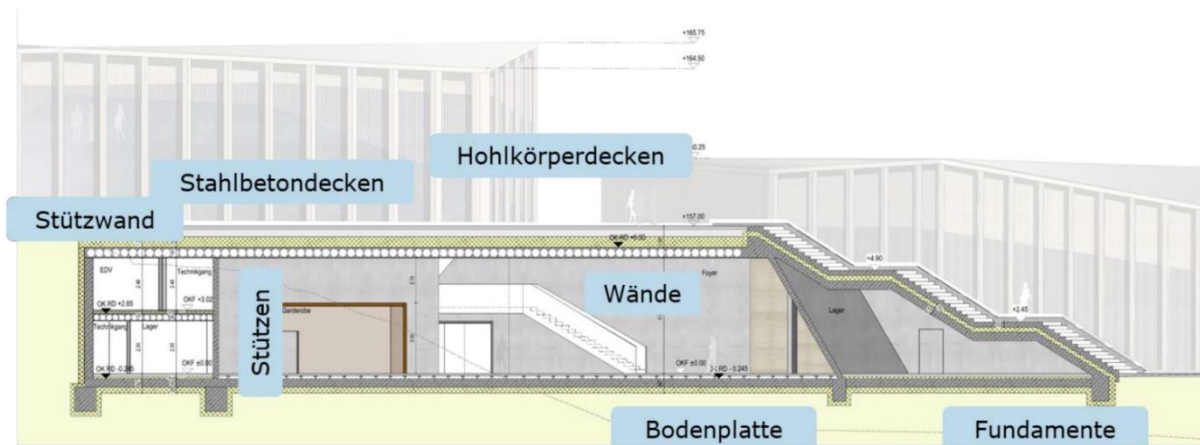


Abb. 5: Lage der in Frage kommenden Betonbauteile im Gebäude

Quelle: ACMS Architekten GmbH

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. Erreicht wurde eine Betonrezeptur, die ca. 30% der CO<sub>2</sub>- Emissionen im Vergleich zu einem bereits nachhaltigen mitteleuropäischen CEM III einsparen kann bzw. fast 50% im Vergleich zu einem Standard C30/37.

Die zusätzliche Verwendung von Hohlkörperdecken führt zu einer Gesamtersparnis bei den CO<sub>2</sub> Emissionen in Höhe von 16%. Für ca. 39 % der Betonbauteile, die nicht in dem sog. „Ökobeton“ hergestellt werden konnten, wurde schließlich noch Recyclingbeton eingesetzt, um die DGNB-Vorgaben zu erfüllen und ein sehr nachhaltiges Gebäude zu errichten.

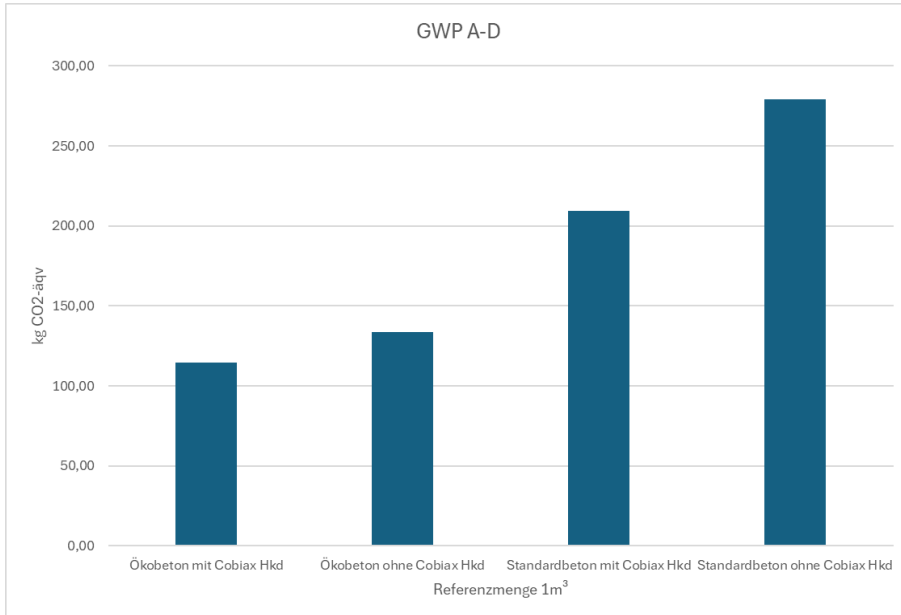


Abb. 6: Vergleich GWP Total zwischen verschiedenen Betonvarianten mit Hohlkörpereinsätzen

Die Gesamtökobilanz der Primärkonstruktionen wies in der ersten Projektstufe ein negatives Ergebnis bei den CO<sub>2</sub> – äqv. Emissionen auf. Im Verlauf der zweiten Stufe hat sich durch die statischen Berechnungen und die Ausführungsplanung der Betonanteil im Vergleich deutlich erhöht, so dass die negativen Emissionen der hier berücksichtigten Holzbauteile in dieser Berechnung nicht vollständig ausreichen, um die anderen Bauteile zu kompensieren.

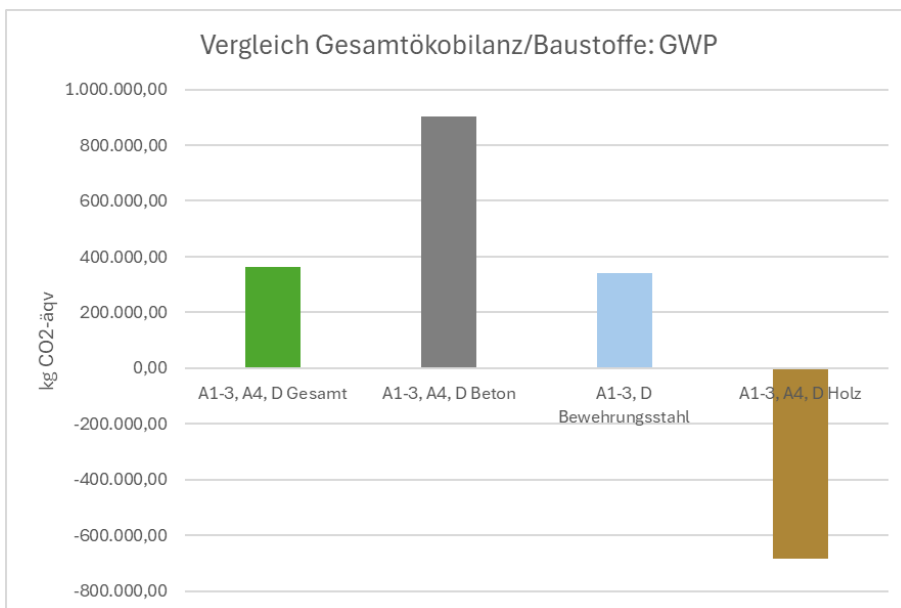


Abb. 7: Vergleich des Einflusses der wesentlichen Baustoffe

## Fazit

Das neue Eingangs- und Veranstaltungsgebäude des Freilichtmuseums Detmold setzt mit dem errechneten GWP-Wert ein Zeichen in der Nachhaltigkeit. Die Verwendung regionaler und emissionsarmer Baustoffe in der Herstellung führt zu einem Gebäude mit niedrigem CO<sub>2</sub> - Fußabdruck. Gleichzeitig erfolgt die Berücksichtigung von Transporten nicht im notwendigen Umfang wobei überraschenderweise gar nicht die Baustoffe sondern die Personen, die zur Baustelle kommen, den größeren Einfluss auf die Bilanz haben. Dieser wird umso größer, je emissionsärmer die Ausgangsbaustoffe sind. Die notwendigen nicht emissionsarmen Baustoffe wurden so gut es geht optimiert und werden in der Gesamtbilanz durch die CO<sub>2</sub> - Bindung des Holzes reduziert. Durch die Architektur wird den Materialien eine hohe Wertigkeit gegeben, und durch das Didaktik-Konzept wird deutlich gemacht werden, dass diese Materialien wiederverwertet werden können. Nicht zuletzt ist die Vermittlung dieses Gedankens auch Aufgabe und Ziel des Freilichtmuseums.

## 5.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 5.1 & 5.2

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 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 dem ausgestellten Gebäude und in der damaligen Zeit eigentlich selbstverständlich war.

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.

Des Weiteren wurde im Zuge der ersten Stufe festgestellt, dass die in den Datensätzen der Umweltproduktdeklarationen (EPDs) in der Datenbank der Ökobau.dat aufgeführten Werte und Angaben zum Transport der Baustoffe lückenhaft und ungenau sind. Die heutigen Ökobilanzen erfassen im Wesentlichen die Transporte innerhalb des Produktionsprozesses, was zu allgemein gültigen Daten führt, die für verschiedene Bauvorhaben verwendet werden können. Für den Neubau des Eingangs- und Veranstaltungsgebäudes in Detmold soll 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.

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.

## **6. Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm**

### **6.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 6**

Dieses Arbeitspaket des Forschungsprojekts beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten mit dem Material Lehm. Dabei geht es im Detail sowohl um die planerischen Anforderungen, die mechanischen und brandtechnischen Eigenschaften sowie die Besonderheiten des Herstellungsprozesses für eine Verwendbarkeit in tragenden Wandkonstruktionen beim Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes im Freilichtmuseum (FLM) Detmold.

Für Planende sowohl aus der Objektplanung als auch aus den Fachdisziplinen Tragwerksplanung, Bauphysik und Brandschutz ergeben sich dafür jedoch noch große Unsicherheiten aufgrund weniger verfügbarer normativer Grundlagen und Literatur. Die Anforderungen an die Objektplanung in Bezug auf den Entwurf, die Planung, die Vergabe der Bauleistung und den späteren Bauprozess für tragende Bauteile aus Stampflehm sind deutlich komplexer als aus konventionellen Bauweisen bekannt. Ander als bei konventionellen, fehlertoleranten Bauweisen meint die Objektplanung dabei in allen Projektstadien die Planung der Ausführung, nicht des Ergebnisses.

Der konzeptionelle Ansatz, tragende Konstruktionen aus Stampflehm einzusetzen, beruht auf der Idee, mit historischen Baumaterialien, die aufgrund ihrer guten Ressourcenverfügbarkeit ökologisch vom Rohstoff zum Baustoff aufbereitet werden können, eine Analogie zum historischen Gebäudebestand des Freilichtmuseums zu schaffen und zugleich die hervorragenden tragenden und bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms für eine museale Nutzung auszuschöpfen.

Die planerische Entscheidung zur Verwendung einer konventionellen Ortbauweise der tragenden Stampflehm-Innenwände resultiert vor allem aus den terminlichen Abhängigkeiten des Gesamtprojektablaufs mit einer Fertigstellung der Vorleistungen im April und einer termingerechten Vergabe im 1. Quartal, sodass die Lehmarbeiten idealerweise in der frostfreien Periode ausgeführt werden können. Eine Vorfertigung vor Ort hätte zudem die Kapazitäten der Baustelleneinrichtungsfläche für die Lagerung der knapp 1.000 Fertigteile überlastet. Eine zentrale Vorfertigung in Schlins, Österreich, hätte aufgrund des Ziels, lokal verfügbaren Lehm zu verwenden, zu hohen Transportemissionen geführt.

Die Ausführung und Verarbeitung der knapp 1.000 t Rohmaterial ist geprägt durch den organisatorischen Feuchteschutz in Verbindung mit den hydrophilen Eigenschaften des Materials. Die Feuchtigkeitsentwicklung vom Einbauzustand bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte bestimmen den Bauprozess und bedürfen einer kontinuierlichen Überwachung und Kontrolle. Gleichzeitig kommen



Maßnahmen zur Verhinderung unkontrollierten Eindringens von Feuchtigkeit oder gegen Frostschäden eine hohe Bedeutung zu.

Aufgrund noch fehlender normativer Grundlagen im Stampflehmbau wurden die Standsicherheitsnachweise der Wandkonstruktionen in Anlehnung an die Mauerwerksnorm DIN EN 1996-1-1 bzw. mit statischen Modellen geführt. Die Untersuchung der materialspezifischen Eigenschaften erfolgte sowohl an Kleinprüfkörpern als auch an großformatigen Bauteilprüfkörpern verschiedener Geometrien und Dimensionen. Insbesondere die Erkenntnisse der großformatigen Bauteilprüfkörper liefern dabei wichtige Informationen zum bereits erwähnten Feuchte- und Trocknungsverhalten und zur Imperfektion in Abhängigkeit zur absoluten Schlankheit größerer Wandkonstruktionen aus Lehm für den Bauprozess. Bei Prüfwänden mit geringeren Schlankheiten hat sich gezeigt, dass die maximale Druckfestigkeit um rund 1/3 abnimmt, wenn die Ausgleichsfeuchte nicht erreicht ist. Der Variationskoeffizient resultierend aus der absoluten Schlankheit des Bauteils steigt unter 20cm Bauteildicke um jeweils 50% bei 25%iger Querschnittsabnahme. Während bei den kleinformatischen Prüfkörpern Druckfestigkeiten an Würfeln i. M. von 3,47 N/mm<sup>2</sup> oder Zylindern i.M. von 2,49 N/mm<sup>2</sup> ermittelt wurden, liegen die Druckfestigkeiten mit Einfluss der nächsthöheren Schlankheit  $l = 2,5$  bei 1,76 N/mm<sup>2</sup>. Bei  $l = 10$  liegen die Ergebnisse i. M. bei 1,57 N/mm<sup>2</sup> und  $l = 13,3$  bei 1,18 N/mm<sup>2</sup>. Zum Kriechverhalten von Lehm liegen ebenfalls bisher keine detaillierten normativen Regelungen vor, sodass auf die Festbetonnorm (DIN EN 1992-1-1 /DIN EN 1992-1-1/NA, Abschnitt 3.1.4.) zurückgegriffen wurde. Das horizontale und vertikale Endschwindmaß wurde mit einer Endkriechzahl i.M. von 4,4 und einer Endkriechdehnung i.M. von 1,08 ‰ ermittelt.

Neben den tragkonstruktiven Anforderungen wurde im Weiteren das Brandverhalten untersucht. Da sich die Angaben in den „Lehmbau Regeln“ Kapitel 5.5.2 ausschließlich auf zurückgezogene Normen beziehen und bauordnungsrechtlich nur für Wohngebäude der Gebäudeklasse 1 und 2 eingeführt sind, waren Brandversuche an Bauteilprüfkörpern erforderlich. An zwei 3m hohen Prüfwänden mit der geplanten Wanddicke 600 mm und 220 mm in Abhängigkeit zur relativen Schlankheit der realen Wandhöhe von 13,3 wurden in der MFPA Leipzig das Verhalten von Lehmkonstruktionen in Bezug auf das Tragverhalten, den Raumabschluss und die Wärmedämmung bei einseitiger Brandbeanspruchung untersucht. Aufgrund der erzielten Prüfergebnisse ergibt sich für die angegebenen Parameter eine Feuerwiderstandsdauer von 102 Minuten, so dass die Feuerwiderstandsklasse REI90-M erfüllt und das Material bedenkenfrei für den vorgesehenen Verwendungszweck als tragende Innenwandkonstruktion verwendbar ist.

## 6.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 6

Die Verwendung des Baustoffs Lehm hat eine weitreichende Tradition. Über die deutschen und europäischen Grenzen hinaus wird das Material für tragende Konstruktionen schon seit über 10.000 Jahren eingesetzt. In Deutschland hingegen erfuhr das Material eher bei raumbekleidenden Fachwerkkonstruktionen eine Breitenanwendung. Lediglich in der Phase der Rohstoffknappheit der Nachkriegszeit der 1950er Jahre wurde mangels Alternativen vermehrt Lehm als Baustoff eingesetzt. In der gleichen Zeit entstanden mit der „Lehmbauordnung“ erste normative Bemühungen zur Regulierung des Lehmbaus in Deutschland. Die normativen Entwicklungen im Bereich des Lehmbaus zur Schaffung planerischer Grundlagen wurden mit Verschwinden des Lehmbaus im kommerziellen Bereich in den 1970er Jahren jedoch ersatzlos wieder zurückgezogen. Erst mit steigendem Bewusstsein der ökologischen Verantwortung des Bausektors in den 1990er Jahren rücken emissionsarme Baustoffe wie Lehm wieder in den Fokus.

Dabei haben sich die Grundcharakteristika des Rohstoffs Lehm über den gesamten Anwendungszeitraum nicht verändert. Diese Charakteristika des Materials prägen auch heute noch die Planung, Bemessung und Umsetzung. Den hydrophilen Eigenschaften kommt dabei in allen Projektstadien eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund dieser bereits im ersten Teil des mehrstufigen Forschungsberichts evaluierten Potentiale erweisen sich in der Nutzungsphase witterungsgeschützte Innenwände mit späterer Sichtenanforderung als besonders geeignet für tragende Anwendungsbereiche.

Die „Lehmbau Regeln“ bieten für kleinere Vorhaben der Gebäudeklasse 1 und 2 eine planerische Grundlage, die auch in den Grundzügen auf größere Projekte wie das Eingangs- und Ausstellungsgebäude anwendbar sind. Insbesondere für die Planung der Ausführung von derartigen oder vergleichbaren Großprojekten reichen die Ansätze jedoch nicht aus. Fragestellungen wie das Herstellungsverfahren der Lehmwände, die nutzungsspezifische Detailplanung in Abhängigkeit zur Fertigungsart, die gewerkespezifischen Bedarfe an Baustellenlogistik und erforderlicher Infrastruktur und nicht zuletzt der Bauprozess einschließlich der gewerkeübergreifenden Schnittstellen und notwendigen Qualitätssicherung bedürfen sorgfältiger projektspezifischer Planung.

In dem vorliegenden Kapitel werden die Untersuchungen einschließlich der Erkenntnisse und Ergebnisse zum Einsatz von tragenden Stampflehm-Innenwänden hinsichtlich der planerischen Anforderungen, des Herstellungsprozesses sowie mechanischen und brandtechnischen Eigenschaften beschrieben, ausgelotet und erläutert.

## **7. Arbeitspaket 7: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Holz**

### **7.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse: AP 7**

Dieses Arbeitspaket des Forschungsprojekts beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Holz. Im Detail mit stahl- und leimfreien Füge-techniken für Holz-Holz-Verbindungen für die tragende Anwendung für das Dachtragwerk des Museums in Detmold.

Der Werkstoff Holz ist auf seine verfügbaren Längen und Querschnitte begrenzt von natürlichen Wachstumsgrenzen. Bei großen Spannweiten werden Verlängerungen und Querschnittserweiterungen unumgänglich. Zunächst wurde in Form einer eingehender Literaturrecherche sowohl der historische Kenntnisstand als auch der aktuelle Stand der Forschung zu klebstoff- und metallfreien nachgiebig zusammengesetzten Holzkonstruktionen ermittelt. Hierbei standen insbesondere klebstofffreie, nachgiebig zusammengesetzte Balkenquerschnitte im Fokus. Nach ausgiebiger Recherche und theoretischen Betrachtungen wurden geeignete Lösungsansätze für die gestellten Aufgaben ermittelt und in weiteren Schritten Anwendungsbezogen vertieft.

Basierend auf den Voruntersuchungen wurde der verzahnt nachgiebig zusammengesetzte, auch als „Zahnbalcken“ bezeichnete Träger als für diese Aufgabe geeignet ausgewählt. Für diese zusammengesetzten historischen Bauteile sind jedoch nur wenige Untersuchungen zur Tragfähigkeit bekannt und auch keine vollständigen Bemessungsansätze vorhanden. Für die Beurteilung ob diese Holzverbindungen ausreichende Tragfähigkeiten aufweisen, um im Bauwesen als nachhaltige Lösung eingesetzt werden zu können wurden analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen angestellt. Dabei wurden Zug- und Schubverbindungen aus historischen Holz-Holzverbindungen abgeleitet und optimiert sodass sie zur Balkenverlängerung und zur Querschnittsvergrößerung eingesetzt werden können. Der erste Teil der Hauptuntersuchungen befasst sich mit der Ausbildung und Bemessung von Längsstößen. Der zweite Teil mit Schubverbindungen zur Querschnittsvergrößerung. Die Prüfkörper der Längsstöße für die experimentellen Untersuchungen wurden in Eigenleistung, die Prüfkörper für die Schubverbindungen wurden vom Kooperationspartner holzius GmbH hergestellt.

Von den historischen Längsstoßverbindungen weist das gerade Hakenblatt die höchste Zugtragfähigkeit auf. Jedoch weist dieser Längsstoß auch nach einer Optimierung der Geometrie nur eine rechnerische Resttragfähigkeit von 14 % im Vergleich zur charakteristischen Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts auf. Diese Tragfähigkeit ist zu niedrig, um einen Einsatz vom geraden Hakenblatt als Zugstoß zu rechtfertigen.

Als effektivste Schubverbindung zur Querschnittsvergrößerung hat sich der historische Zahnbalcken herausgestellt. Die Abmessungen der Verzahnung wurden in Bezug auf die Schubtragfähigkeit hin

optimiert. Um die Schubtragfähigkeit bewerten zu können wird der Verschiebungsmodul benötigt, welcher analytisch mit Hilfe von Rechenmodellen und numerischen Simulationen bestimmt und in einem weiteren Schritt experimentell nachgewiesen wurde. Mit dieser Biegesteifigkeit kann die Biegetragfähigkeit eines Balkens quantifiziert werden. Im Vergleich zu einem Vollholzquerschnitt mit den gleichen Abmessungen beträgt diese beim untersuchten Zahnbalken rechnerisch rund 81%. Alle Prüfkörper der 4-Punkt-Biegeversuche die haben die rechnerisch ermittelte Maximallast überschritten. Somit ist die Schubtragfähigkeit der Verzahnung in der Verbundfuge eines nachgiebig zusammengesetzten Biegeträgers ausreichend, um für tragende Zwecke in stahl- und leimfreien Konstruktionen eingesetzt werden zu können.

## 7.2 Einführung in das Forschungsthema: AP 7

Der Trend in der Architektur, mit großen Spannweiten große und helle Räume zu erhalten, ist im modernen Bauwesen allgegenwärtig. Gleichzeitig rücken nachhaltige Bauweisen in Hinsicht auf Ressourcenknappheit und Schadstoffbelastungen immer mehr in den Fokus. Das Thema des nachhaltigen Bauens umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Dazu gehört die Materialwahl, die Herstellung der Bauteile, die Nutzungsdauer des Bauwerks und die Frage der Rückbaubarkeit.

Hinsichtlich Instandhaltungsmaßnahmen sowie den Rückbau eines Gebäudes wäre es vorteilhaft zerstörungsfrei lösbare Aufbauten vorzufinden, die es ermöglichen, im Schadensfall einzelne Elemente auszutauschen oder die Konstruktion sortenrein rückbaubar zu machen. Durch ein sortenreines Trennen können wiedergewonnene Bauteile oder Materialien in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Vor diesem Hintergrund bieten reine Holzkonstruktionen, die auf metallische Verbindungsmittel und Klebstoffe verzichten, eine nachhaltige Lösung.

Historisch bewährte Holz-Holzverbindungen erfüllten diesen nachhaltigen Ansatz. Im Zuge der Industrialisierung wurden diese in der Herstellung aufwendigen, traditionellen Holz-Holzverbindungen jedoch durch modernere Techniken ersetzt. Diese modernen Bauweisen zeichnen sich jedoch durch die Verwendung ressourcenintensiver Bestandteile aus, welche im Rückbau nicht mehr sortenrein trennbar sind.

Erlebte der Holzbau im Zuge der Energiekrise, zum Ende des 20. Jh. seine Renaissance, so liegt es auch begründet in der fortgeschrittenen Berechenbarkeit der Statik der Holzbauten. So sind heute für die gängigsten Bauhölzer ausführliche Tabellen der Festigkeiten unter Berücksichtigung der natürlichen Streuungen vorhanden. Die statischen Berechnungsmöglichkeiten, die sich im modernen Holzbau entwickelt haben, liefern zusammen mit den experimentell ermittelten Festigkeiten, verlässliche Prognosen zur Standsicherheit. Parallel dazu sind auch mit der inzwischen im Holzbau weit verbreiteten Einführung CNC-gestützter Abbundanlagen handwerklich zeitaufwändige Konstruktionen ökonomisch realisierbar.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, anhand von analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen eine Aussage zu treffen, inwiefern stahl- und leimfreie Holzverbindungen eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen, um im Bauwesen als nachhaltige Lösung eingesetzt werden zu können.

## 8. Literaturverzeichnis

BEYOND ZERO EMISSIONS: Rethink Cement. 2017. URL:

<https://www.bze.org.au/research/report/rethinking-cement> Abruf: 30.04.2024

SCHWARZKOPP, F., DRESCHER, J., GORNING, M. UND BLAZEJCZAK, J.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und -Erde-Industrie bis 2035 in Deutschland. 2019. URL: [https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user\\_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie\\_2019.pdf](https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie_2019.pdf). Abruf: 30.04.2024.

SOBEK, W.: Den Gesetzten der Physik und dem Wohle der Menschen dienen. 2013. In: Deutsche Ingenieur Blatt, 7/8.

UMWELTBUNDESAMT (Herausgeber): Abfallaufkommen. 2019. URL:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#bau-abbruch-gewerbe-und-bergbauabfalle>. Abruf: 30.04.2024

## 9. Veröffentlichungen

Die Inhalte des Forschungsberichts wurden in Teilen oder als ganzes in den nachfolgenden Publikationen oder Fachveranstaltungen veröffentlicht:

*BLASCHKE, K. K., SCHWICKERT, S.; KOB, M.: Schallabsorptionseigenschaften von Lehmoberflächen. Bauphysik 45, H. 6, S. 289–296. 2023*

*BLASCHKE, K. K., SCHWICKERT, S.; KOB, M.: Akustische Eigenschaften von Lehmoberflächen Technische Hochschule OWL; HfM Detmold, Erich-Thienhaus-Institut Proceedings of DAGA 2022 – 48. Deutsche Jahrestagung für Akustik 21. bis 24. März 2022 in Stuttgart*

*SONNBORN, C., WAIGAND, S., KERSTING, M.: Feuerprobe für den Lehmbau In: DBZ Ausgabe 10/2022*

*WIGGER, H., INCE, M., BURKERT, T., SCHULZ, J.-U., WAIGAND, S.: Stampflehmwände als tragendes Bauteil – am Beispiel der Errichtung des Freilichtmuseums in Detmold. In: Mauerwerk-Kalender 2025 (Veröffentlichung in Vorbereitung) 2025*

*WAIGAND, S.: LehmBaupraxis! Stampflehm als Tragkonstruktion Neubau Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum Detmold – conluto Architekten-Tagung 2023. 23.03.2023 in Detmold*

*WAIGAND, S.: LehmBaupraxis! Von der Planung zur Realisierung von tragenden Stampflehmkonstruktionen Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes am FLM Detmold – conluto Architekten-Tagung 2024. 14.03.2024 in Detmold*

*WAIGAND, S.: Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum Detmold – LEHM 2024 – 9. Internationale Fachtagung für Lehm-Bau. 27. Bis 29 September 2024 in Weimar (in Vorbereitung)*