ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

BBSR-
Online-Publikation
81/2024

Upcycling mineralischer Bau- und Abbruchabfälle (upMIN 100)

von

Prof. Andrea Klinge
Dr. Wolfgang Horn
Dr. Ute Kalbe
Julian Mönig
Dr. Matthias Richter
Prof. Eike Roswag-Klinge
Ulrich Röhlen
Prof. Christof Ziegert

Upcycling mineralischer Bau- und Abbruchabfälle (upMIN 100)

100-prozentige Substitution natürlicher Gesteinskörnungen und Bindemittel in wiederverwendbaren Lehmbaustoffen

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.24
Projektlaufzeit: 01.2022 bis 12.2023

IMPRESSUM

Herausgeber
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren
Technische Universität Berlin
Prof. Andrea Klinge (Projektleitung)
klinge@zrs.berlin

Dr. Wolfgang Horn
Dr. Ute Kalbe
Julian Mönig, M. Sc.
Dr.-Ing. Matthias Richter
Prof. Dipl.-Ing. Eike Roswag-Klinge
Dipl.-Ing. Ulrich Röhlen
Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert

Weitere Mitwirkende siehe Kapitel „Mitwirkende“

Redaktion
Technische Universität Berlin
Julian Mönig

Stand
September 2024

Gestaltung
Technische Universität Berlin
Julian Mönig

Bildnachweis
Titelbild: Julian Mönig
Fotografien siehe Kapitel „Abbildungsverzeichnis“

Vervielfältigung
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise
Klinge, Andrea; Horn, Wolfgang; Kalbe, Ute; Mönig, Julian; Richter, Matthias; Roswag-Klinge, Eike; Röhlen, Ulrich; Ziegert, Christof, 2024: Upcycling mineralischer Bau- und Abbruchabfälle (upMIN 100): 100-prozentige Substitution natürlicher Gesteinskörnungen und Bindemittel in wiederverwendbaren Lehmbaustoffen. BBSR-Online-Publikation 81/2024, Bonn.

ISSN 1868-0097 Bonn 2024

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 6

Abstract 8

Einführung 10
- Themenfeld 10
- Untersuchungsgegenstand 13

Problemstellung 14
- Stand der Forschung/Baupraxis 14
- Forschungslücke/Entwicklungsbedarf 15

Zielstellung 16
- Konkrete Projektziele 16
- Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu 16

Forschungsdesign 18
- Arbeitshypothesen 18
- Methodischer Ansatz 18
- Projektteam und Organisation, Kooperationspartner 21
- Arbeitspakete und Meilensteine 22

Projektverlauf 25
- AP 1 – Darstellung Rahmenbedingungen & Grundlagen 25
- UAP 1.1 – Projektrelevante gesetzliche Anforderungen 25
- UAP 1.2 – Stoffströme 34
- UAP 1.3 – Anforderungen an Lehmbaustoffe 37
- AP 2 – Schadstoffuntersuchungen Ausgangsmaterial & Raumluft 38
- UAP 2.1 – Schadstoffuntersuchungen am Rezyklat im Feststoff 38
- UAP 2.2 – Schadstoffuntersuchungen am Rezyklat im Eluat und Abgleich mit Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung 47
- UAP 2.3 – Screeningtests schwerflüchtiger Stoffe (Thermoextraktion) 52
- UAP 2.4 – Messungen Luftschadstoffemissionen 55
- AP 3 – Material- und Baustoffentwicklung & -prüfung 59
- UAP 3.1 – Sensorische Bewertung der Ausgangsmaterialien 63
- UAP 3.2 – Rezeptur Entwicklung 64
- UAP 3.3 – Baustoffprüfung nach DIN 18945 und 18947 72
- AP 4 – Lebenszyklusanalyse 83
- UAP 4.1 – Definition Geltungsbereiche & Ziele 83
- UAP 4.2 – Eingaben in Bezug auf Prozesse 87
- UAP 4.3 – Inventar 88
- UAP 4.4 – Bewertung und Interpretation 89
- AP 5 – Öffentlichkeitsarbeit & Vermarktung 91
- AP 6 – Projektmanagement & Berichterstattung 96

Zusammenfassung Ergebnisse 97
Bewertung/Diskussion/Zielerreichung 97
Mitwirkende 99
Kurzbiographien 100
Literaturverzeichnis 102
Abbildungsverzeichnis 106
Tabellenverzeichnis 109
Abkürzungen 111
Anlagen 111

Kurzfassung

Der Bausektor ist einer der ressourcenintensivsten Sektoren in Deutschland und für 51 % der CO_2-Emissionen verantwortlich. Für den Bau von Gebäuden werden in Deutschland jährlich ca. 517 Mio. Tonnen mineralische Rohstoffe benötigt [1]. Gleichzeitig fielen in 2020 ca. 229 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle an, die ca. 55 % des gesamten Abfallaufkommens ausmachen [2]. Mineralische Bauabfälle bilden mit 218,8 Mio. t (2018) den größten Stoffstrom. 130,3 Mio. t entfielen auf Boden und Steine, 59,8 Mio. t auf Bauschutt [3].

Die neue Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrGW) sieht nach der Abfallvermeidung als wichtigste Instrumente die Wiederverwendung und das Recycling vor [4]. Im Baustoffrecycling konnten seit 2000 die Raten vor allem für mineralische Abfälle gesteigert werden. Dennoch wird der Großteil der rezyklierten Gesteinskörnungen in technisch weitgehend ungeregelten Anwendungen (z.B. Straßen- und Erdbau) eingesetzt. Dieses Downcycling führt zu einem Verlust von wertvollen Ressourcen für technisch und wirtschaftlich hochwertige Nutzungen.

Für die Feinfraktion < 2 mm (5 Mio. t) fehlen bislang Anwendungsmöglichkeiten, da sie nach DIN EN 206 und DIN 1045-2 im Recyclingbeton nicht zugelassen sind [5] [6]. Diese Stoffströme werden überwiegend deponiert und nur z. T. im Straßen- und Deponiebau genutzt. Es ist zu erwarten, dass die geplante Mantelverordnung diesen Anteil weiter erhöhen wird [7].

Der Einsatz dieser Korngrößen in Lehmbaustoffen, die je nach Ausgangsstoffen und Produkt 5 - 70 % ausmachen, ist in den derzeit gültigen Lehmbaustoff-Normen DIN 18945 - 18948 nicht zugelassen, darin sind als Zuschläge nur natürliche Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Mehl aus mörtelfreien Ziegeln sowie Blähperlit etc. nach DIN EN 13055-1 und als Bindemittel nur Baulehm aus natürlichen Vorkommen vorgesehen [8] [9] [10] [11] [12] [13].

Um den Einsatz von rezyklierten Bau- und Abbruchabfällen für Lehmbaustoffe in der Norm zu ermöglichen, müssen

- die technische Durchführbarkeit,
- Qualitätsanforderungen an Ausgangsstoffe (z.B. Schadstoffgrenzwerte in Bezug auf Gesundheits - und Umweltverträglichkeit (Grundwasser/Boden) sowie gefährlicher Substanzen)
- zulässige Anteile der Rezyklate

geregelt werden.

Ziel des Forschungsvorhaben upMIN 100 ist es Anwendungsmöglichkeiten für mineralische Bau- und Abbruchabfälle zu identifizieren, die bislang deponiert werden. Generell soll damit die Menge an Bau- und Abbruchabfälle, aber auch der Bedarf an mineralischen Primärrohstoffen und damit die Eingriffe in unserer Ökosysteme reduziert werden, die zunehmend an ihre Belastungsgrenzen kommen bzw. diese zum Teil bereits überschritten haben [14]. Im Forschungsprojekt wird daher untersucht, ob und zu welchen Anteilen mineralische Bau- und Abbruchabfälle der Feinfraktion (<2 mm), als Ausgangsstoffe in Lehmbaustoffen Anwendung finden können. Dabei geht es darum, die technische Machbarkeit und die Schadstofffreiheit nachzuweisen sowie die ökologischen Auswirkungen zu bewerten.

Zentrale Fragen in Bezug auf zulässige Schadstoffgehalte im Ausgangsmaterial sowie baustoffbedingte Emissionen in die Raumluft werden im Detail betrachtet, da diese maßgeblich für eine Zulassung in der Normung sind. Dazu wird eine Überprüfung der rezyklierten Fein- und Feinstfraktion auf Schadstoffe im Feststoff (Königswasseraufschluss) und im Eluat (Säulen- o. Schüttelversuche nach DIN 19528 / CEN TS 16637-3 oder DIN 19529/DIN EN 12457-4 beim Wasser-Feststoffverhältnis 2 l/kg bzw. 10 l/kg) durchgeführt und mit Grenzwerten des Entwurfes der Ersatzbaustoffverordnung sowie den Anforderungen des DIBt (MV V TB, Tabelle A-2, Anhang A) abgeglichen [15] [16] [17] [18] [19].

Foto: © NBL

Abbildung 1: Rezyklierte Gesteinskörnungen

Über die Entwicklung zweier Lehmbaustoffe (Lehmstein, Lehmputzmörtel) soll die technische Machbarkeit geprüft sowie Anforderungen an die Rezyklate definiert werden. Um den Rezyklatanteil im Baustoff zu maximieren, wird eine Substitution der natürlichen Gesteinskörnung zu 100 % sowie des Bindemittels zu 80 % - 100 % angestrebt. Baustoffprüfungen nach DIN 18945 und 18947 sollen diese Werte validieren bzw. zulässige Anteile festlegen [5] [6].

Um eine gesundheitsgefährdende Wirkung der entwickelten Baustoffe auszuschließen, werden diese in Bezug auf Schadstoffemissionen in der Raumluft untersucht. Zur Abschätzung der potenziellen Genehmigungsfähigkeit bzgl. Innenraumlufthygiene werden Prüfungen in Anlehnung an die Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes (ABG) des DIBt durchgeführt, die in Anhang 8 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MV V TB) veröffentlicht sind [20]. Diese Untersuchungen betreffen vorrangig Emissionen flüchtiger organischer Komponenten (VOC). Zudem soll mit Screeningversuchen das Emissionspotenzial relevanter schwerflüchtiger Schadstoffe, aber auch weiterer kritischer Stoffe wie PAK abgeschätzt werden.

Eine projektbegleitende Lebenszyklusanalyse untersucht die Umweltwirkung der Entwicklungen und dient auch dazu, unerwartete Verschlechterungen der Ökobilanz im Vergleich zu Lehmbaustoffen auf Basis von Primärrohstoffen aufzuzeigen.

Zum Zeitpunkt der Einreichung des Schlussberichts haben sich einige der o.g. Umstände verändert. So konnte z.B. mit Erkenntnissen aus dem Projekt die Möglichkeit zur Nutzung von Rezyklaten in die gültigen DIN-Normen aufgenommen werden.

Abstract

The building sector is one of the most ressource-intensive economic sectors of germany and responsible for 51 % of CO_2 emission [21]. For the construction of buildings approx. 517 mio t of mineral raw material are needed [1]. At the same time in 2020 approx. 229 mio. t of construction and demolition waste accrued, which account for approx.. 55 % of the total waste amount [2]. Mineral construction waste forms the biggest material flow with 218,8 mio. t (2018). 130,3 mio. t includes soil and stones and 59,8 mio. t construction waste [3].

The new waste hierarchy of circular economy law (ger.: Kreislaufwirtschaftsgesetz, short: KrGW) sees reuse and recycling as the most important tools after waste prevention [4]. Since 2000 the recycling rates increased especially for mineral construction waste. However: the majority of recycled minerals is used in unregulated applications such as infrastructural constructions. This downcycling process leads to a loss of valuable ressource.

For the fine fraction < 2 mm (5 Mio. t) there are no possible applications because they are not permitted in concrete according to DIN EN 206 and DIN 1045-2 [5] [6]. The material flows are mainly landfilled and only used in road and landfill construction. It is to be expected that the planned covering agreement will further increase the use [7].

The use of these grain sized in earth materials, which make up to 5 - 70 % depending on the materials, is not permitted in the valid standards DIN 18945 - 18948, as these only use natural aggregates according to DIN EN 12620 and DIN EN 13055-1 [8] [9] [10] [11] [12] [13].

In order to enable the use of recycled construction and demolition waste for earth materials the following aspects have to be regulated:

- Technical feasibility
- Quality requirements for starting materials (e.g. pollutant limit values with regard to health and environmental compatibility (groundwater/soil) and hazardous substances)
- Permitted amounts of recyclates

The aim of the upMIN100 research project is to identify possible uses for mineral construction and demolition waste that has so far been landfilled in order to generally reduce the amount of construction and demolition waste and the need for mineral primary raw materials. The research project is therefore investigating whether and to what extent mineral construction and demolition waste of the fine fraction (<2 mm) can be used as starting materials in earth building materials. The aim is to prove the technical feasibility and freedom from harmful substances and to evaluate / balance the ecological effects.

Central questions relating to permissible pollutant levels in the starting material and material related emissions into the indoor air are considered in detail, as these are decisive for approval in the standardization. For this purpose the recycled fine fraction is checked for pollutants in the solid (Aqua Regia Digestion) an in the eluate (Column experiments or batch extraction according to DIN 19528 / CEN TS 16637-3 or DIN 19529/DIN EN 12457-4 at a water-solid ratio of 2 l/kg or 10 l/kg) and compared with the limit values of the draft of the substitute building materials ordinance and the requirements of the DIBt (MV V TB, Table A-2, Appendix A) [15] [16] [17] [18] [19].

The technical feasibility of the development of two earth material products (earth block and earth plaster mortar) is to be checked and the requirements for the recycling material are to be defined. In order to maximize the proportion of recycled material in the building material a substitution of 100 % of the natural aggregate and 80 % - 100 % of the binding material is aimed. Building material tests according to DIN 18945 und 18947 are intended to validate these values and define permissible proportions [5] [6].

In order to rule out any health-endangering effects of the developed building materials, they are examined with regard to pollutant emissions into the room air. In order to estimate the potential approvability with regard to indoor air hygiene, tests are carried out based on the requirements for physical structures with regard to health protection (ABG) of the DIBt, which are published in Appendix 8 of the model administrative regulation for technical building regulations (MV V TB) [20]. These investigations primarily concern emissions of volatile organic components (VOC). In addition, the emission potential of relevant non-volatile pollutants, but also other critical substances such as PAK, is to be estimated with screening tests.

A project-accompanying life cycle analysis examines the environmental impact of the developments and also serves to show unexpected deterioration in the ecological balance in comparison to earth building materials based on primary raw materials.

By the time the final report was submitted, some of the above-mentioned circumstances had changed. For example, findings from the project enabled the possibility of using recycled materials to be included in the applicable DIN standards.

Einführung

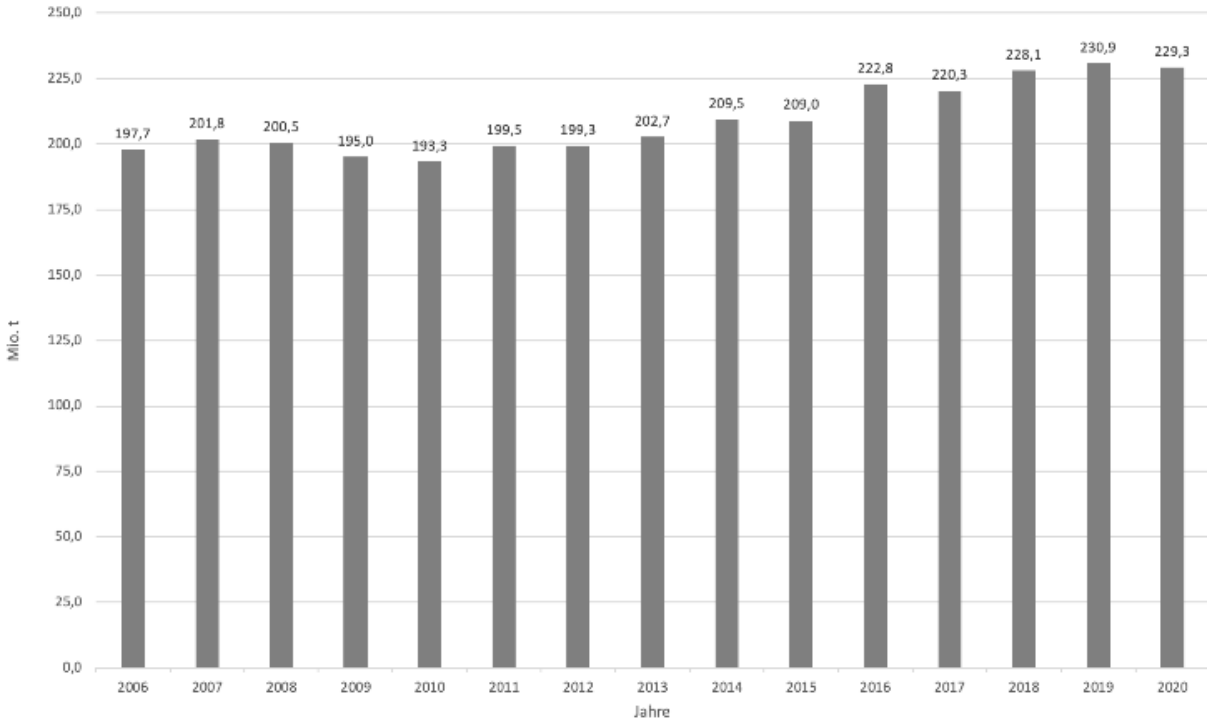
Foto: ZRS Architekten Ingenieure

Abbildung 2: Abbruchbaustelle in Berlin

Themenfeld

Der Bausektor ist einer der ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren in Deutschland und für 51 % der CO_2-Emissionen verantwortlich [1]. Für den Bau von Gebäuden werden in Deutschland jährlich ca. 517 Mio. Tonnen mineralische Rohstoffe benötigt [2]. Dabei geht es um den Abbau großer Mengen an mineralischen Rohstoffen wie Steine, Kiese, Sand und Ton, der mit erheblichen Eingriffen in den Natur- und Landschaftshaushalt verbunden ist.

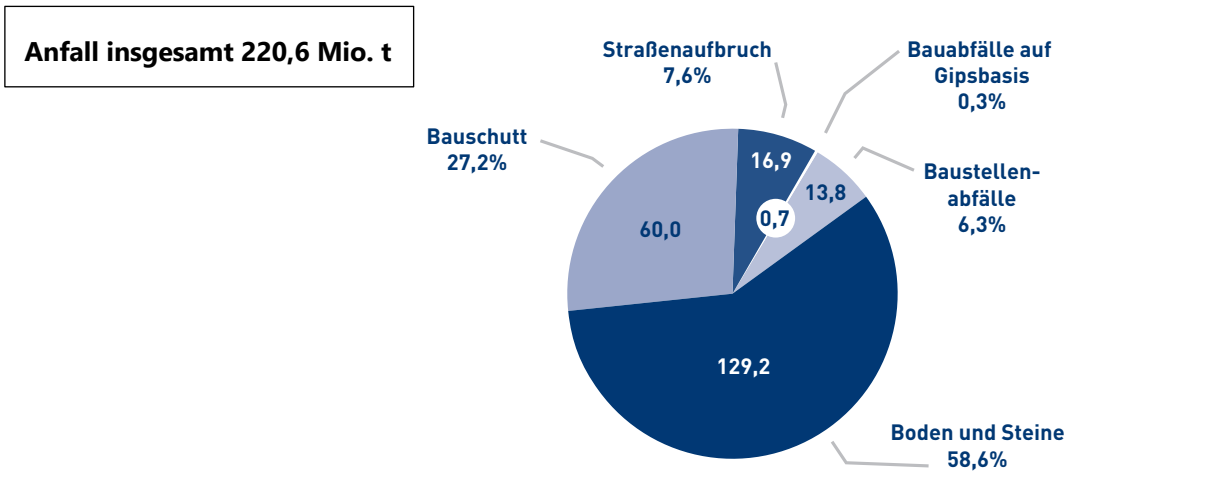
Gleichzeitig fielen im Jahr 2020 ca. 229 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle an, die ca. 55 % des gesamten Abfallaufkommens in Deutschland ausmachen [3]. Aufgrund der anhaltend hohen Bautätigkeit der letzten Jahre ist diese Tendenz nach wie vor steigend. Abbildung 3 illustriert die jährliche Menge an Bau- und Abbruchabfällen in Mio. t in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2020.



Grafik: ZRS Architekten Ingenieure

Abbildung 3: Jährliche Menge an Bau- und Abbruchabfällen in Mio. t in Deutschland von 2006 bis 2020 [2]

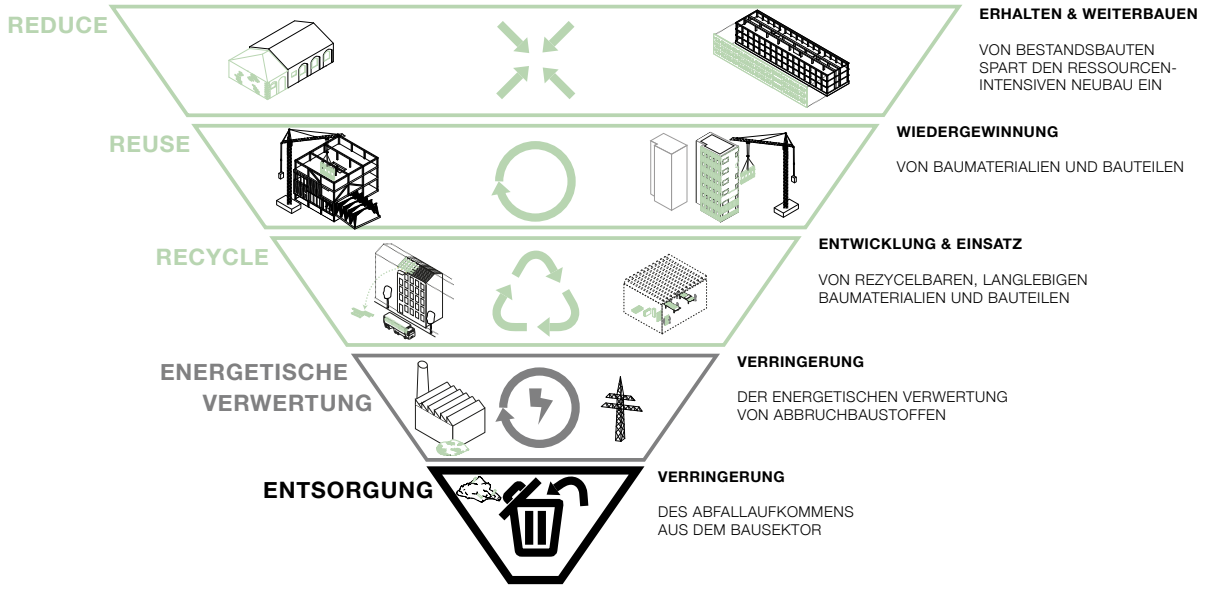
Dem 13. Monitoring-Bericht des Branchenverbundes Kreislaufwirtschaft Bau lassen sich detaillierte Zahlen über die Zusammensetzung dieser Stoffströme aus dem Jahr 2020 entnehmen. Der Großteil dieser Abfälle (58,6 %) besteht aus Boden und Steinen (129,2 Mio. t), der aufgrund von Tiefbaumaßnahmen oder Infrastrukturmaßnahmen entsteht. Bauschutt macht mit 60 Mio. t (27,2 %) den zweitgrößten Teil aus, gefolgt von Straßenaufbruch mit 16,9 Mio. t (7,6 %) und Baustellenabfällen mit 13,8 Mio. t (6,3 %). Bauabfälle auf Gipsbasis machen mit 0,7 Mio. t den geringsten Teil aus (0,3 %).



Grafik: 13. Monitoring-Bericht, Kreislaufwirtschaft Bau (2021)

Abbildung 4: Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle in Mio. Tonnen in 2020 [3]

Die neue Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrGW), die seit 2012 in Kraft ist, sieht nach der Abfallvermeidung als wichtigste Instrumente die Wiederverwendung und das Recycling vor [4]. Im Baustoffrecycling konnten seit 2000 die Raten vor allem für mineralische Abfälle gesteigert werden. Dennoch wird der Großteil der rezyklierten Gesteinskörnungen in technisch weitgehend ungeregelten Anwendungen (z.B. Erd- und Straßenbau) eingesetzt. Dieses Downcycling führt zu einem Verlust von wertvollen Ressourcen für technisch und wirtschaftlich hochwertige Nutzungen.



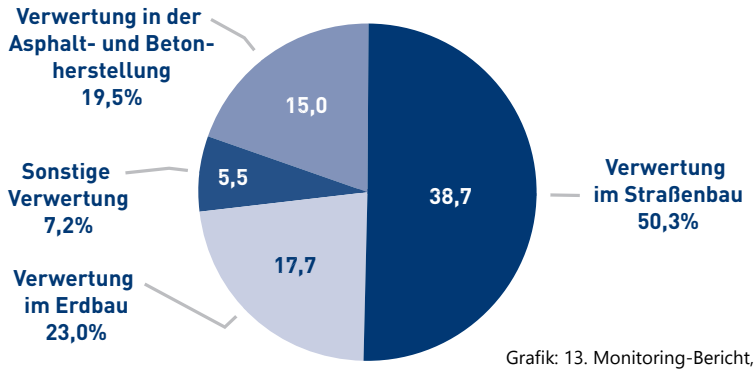
Grafik: ZRS Architekten Ingenieure

Abbildung 5: Abfallhierarchie gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Gemäß 13. Monitoring-Bericht Kreislaufwirtschaft Bau konnten aus den Bau- und Abbruchabfällen insgesamt 76,9 Mio. t Recycling-Baustoffe hergestellt werden. Schaut man sich die Zahlen im Detail an, so stellt man fest, dass trotz einschlägiger Gesetzgebung und vielfältigster Bemühungen auf unterschiedlichsten Ebenen der überwiegende Teil dieser Ressourcen im Straßenbau (50,3 %) bzw. im Erdbau (23 %) also in einem klassischen Downcycling eingesetzt wird. 5,5 Mio. t dieser RC-Baustoffe können einer sonstigen Verwertung zugeführt und nur 19,5 % (15 Mio. t) in einem hochwertigen Recycling in Form von Asphalt- und Betonherstellung verwertet werden, wovon der größere Teil die Asphaltherstellung ausmacht.

RC Baustoffe insgesamt

76,9 Mio. t



Grafik: 13. Monitoring-Bericht, Kreislaufwirtschaft Bau (2021)

Abbildung 6: Verwertung der Recycling-Baustoffe in 2020 in Mio. Tonnen

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Korngrößen innerhalb dieser Stoffströme lässt sich feststellen, dass für die Feinfraktion < 2 mm (5 Mio. t) bislang Anwendungsmöglichkeiten fehlen, da sie nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 im Recyclingbeton nicht zugelassen sind [5] [6]. Diese Stoffströme werden überwiegend deponiert und nur z. T. im Straßen- und Deponiebau genutzt. Es ist zu erwarten, dass die geplante Mantelverordnung diesen Anteil weiter erhöhen wird [7].

Untersuchungsgegenstand

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen hochwertige Anwendungsmöglichkeiten für diese Feinfraktion entwickelt werden. Im Detail soll die Fragestellung untersucht werden, ob und in welchem Maße rezyklierte mineralische Bau- und Abbruchabfälle sowie mineralische Abfälle aus den Brech- und Waschprozessen für die Herstellung von Ersatzbaustoffen (Korngrößen < 2 mm), die derzeit überwiegend deponiert werden, als Rohstoffersatz in Lehmbaustoffen eine technisch und wirtschaftlich höherwertige Anwendung finden können. Die aktuelle Normung für Lehmbaustoffe lässt derzeitig nur natürliche Gesteinskörnungen als Zuschläge sowie Lehm aus natürlichen Vorkommen oder Recyclinglehm als Bindemittel zu.

Zudem sollen zentrale Fragen in Bezug auf zulässige Schadstoffgehalte im Ausgangsmaterial gemäß DIN 4226-101 sowie baustoffbedingte Emissionen in die Innenraumluft im Detail betrachtet werden, da diese maßgeblich für eine Zulassung in der Normung sind. Der Aspekt der Innenraumlufthygiene ist in Bezug auf einen hochporösen Baustoff, der im Innenraum zum Einsatz kommt, im Detail zu beleuchten, um gesundheitsrelevante Folgen ausschließen zu können.

Um Fragen zur technischen Machbarkeit beantworten zu können, wird im Vorhaben die exemplarische Entwicklung von zwei wiederverwendbaren Lehmbaustoffen (Lehmstein, Lehmputzmörtel) angestrebt, um zukünftig sowohl das Abfallaufkommen als auch die Rohstoffinanspruchnahme zu reduzieren, sollen zum einen die Zuschläge bis zu 100 % aber auch das natürliche Bindemittel Ton zu 80 % - 100 % substituiert werden. Der Machbarkeitsnachweis für beide Entwicklungen soll in Form eines Prototyps erbracht werden. Es wird angestrebt, für beide Baustoffe einen Technologie-Reifegrad 4-5 (TRL 4-5) zu erreichen.

Um die Umweltwirkung der angestrebten Entwicklungen bewerten zu können, soll eine projektbegleitende, vergleichende Ökobilanz (LCA) erstellt werden, die ganzheitlich alle die für die Herstellung der Rezepturen notwendigen Prozesse gemäß DIN EN 15804 bilanziert [22]. Als Benchmark dient die Materialherstellung einer vergleichbaren Rezeptur auf Basis von Primärrohstoffen.

Problemstellung

Stand der Forschung/Baupraxis

Die aktuelle Normung für Lehmbaustoffe (DIN 18945 – DIN 18948) lässt derzeit keine rezyklierten Bau- und Abbruchabfälle als Zuschlag oder Bindemittel für die Herstellung eines Lehmbaustoffs zu [8] [9] [10] [11]. Auch die Lehmbau Regeln (in allen Bundesländern eingeführte Technische Baubestimmung), die Recyclinglehm als einen trocken zerkleinerten Lehmbaustoff definieren, der sortenrein aus dem Rückbau von Lehmbauteilen gewonnen wurde, durch Zugabe von Wasser replastifiziert und als Baulehm im Produktionsprozess weiterverwertet werden kann, lassen keinen Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen zu [23].

Das EU geförderte Forschungsprojekt RE^4 REuse and REcycling of CDW materials and structures in energy efficient pREfabricated elements for building REfurbishment and construction (09/2016 – 02/2020), beschäftigte sich schwerpunktmässig mit dem Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe (2 - 32 mm) in Betonfertigteilen. Der Einsatz von rezyclierten Gesteinskörnungen der Feinstfraktion in Lehmbaustoffen wurde als Teilaspekt experimentell für Lehmputz, -mauermörtel und Stampflehm betrachtet. Erste Untersuchungen im Baustofflabor in Bezug auf die technische Realisierbarkeit sowie den technisch möglichen Recyclinganteil der Zusatzstoffe (je nach Baustoff ca. 60 – 80 %) erreichten TRL 4. Die Substitution des Bindemittels, Schadstoffgehalte im Ausgangsmaterial bzw. Schadstoffemissionen der entwickelten Baustoffe in die Raumluft wurde im Rahmen des Vorhabens nicht betrachtet [24].

Im Rahmen der vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhaben StandardLehm und StandardBoard wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) die Grundlagen für die derzeitige Generation der Lehmbaustoffnormen gelegt. Im gegenwärtig von der DBU geförderten Vorhaben „Bemessungskonzept Lehmsteinmauerwerk" werden die Grundlagen für eine zeitgemäße Konstruktions- und Bemessungsnorm geschaffen.

Im Forschungsvorhaben Baucycle haben Forscher der Institute für Bauphysik, Materialfluss und Logistik, Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung sowie Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik gemeinsam an einem Konzept zur Sortierung und Aufbereitung anfallender Abbruchmaterialien und deren Verarbeitung zu Recyclingbaustoffen gearbeitet. Ziel war es durch neue Sortiertechnologien Materialien nicht nur nach Farbunterschieden und Helligkeit zu sortieren, sondern auch chemische Unterschiede in den Partikeln zu identifizieren. Diese sollen nach bauschuttrelevanten Attributen wie sulfatisch, silikatisch oder calcitisch erfasst und gemäß diesen Kriterien sortiert werden. Die Sortiermethoden wurden im Hinblick auf die Wiederverwertbarkeit von Betonbruch entwickelt, da der Gipsgehalt ein entscheidendes Kriterium darstellt und ein optimales Sortierergebnis von der Trennung zwischen Gipspartikeln und Bauschutt abhängt. Die Granulate sollen als Zementrohstoff sowie für den Einsatz von akustisch wirksamen Bauteilen genutzt werden. Zudem ist die Entwicklung eines zementfreien Bindemittels vorgesehen. Durch die Entwicklung von Rezyklaten und Sekundärrohstoffen auf Basis von Bauschutt und die Etablierung einer innovativen Logistikplattform sollen Stoffkreisläufe im Bausektor geschlossen werden [25] [26].

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Der Einsatz von rezyklierten Korngrößen < 2 mm in Lehmbaustoffen, die je nach Ausgangsstoffen und Produkt 5 - 70 % ausmachen, ist in den derzeit gültigen Lehmbaustoff-Normen DIN 18945 - 18948 nicht zugelassen, da diese als Zusatzstoffe nur natürliche Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Mehl aus mörtelfreien Ziegeln sowie Blähperlit etc. nach DIN EN 13055-1 und als Bindemittel nur Baulehm aus natürlichen Vorkommen vorsehen [8] [9] [10] [11] [12] [13].

Um den Einsatz von rezyklierten Bau- und Abbruchabfällen für Lehmbaustoffe in der Norm zu ermöglichen, müssen

- die technische Durchführbarkeit,
- Qualitätsanforderungen an Ausgangsstoffe (z.B. Schadstoffgrenzwerte in Bezug auf Gesundheits - und Umweltverträglichkeit (Grundwasser/Boden) sowie gefährlicher Substanzen)
- zulässige Anteile der Rezyklate

geregelt werden.

Aktuelle Sortier- und Aufbereitungsmethoden werden im Hinblick auf die technische sowie die wirtschaftliche Machbarkeit überprüft und wenn notwendig und möglich optimiert. Zudem werden diese einer Ökobilanzierung unterzogen, um die Umweltwirkungen zu analysieren und mit marktüblichen Prozessen vergleichen zu können.

Zielstellung

Konkrete Projektziele

Im Rahmen des Projektes werden hochwertige, umweltfreundliche, mineralische Baustoffe aus bis zu 100% rezyklierten Bau und Abbruchabfällen für den Alt- und Neubau entwickelt. Durch konsequentes Upcycling werden mineralische Bau- und Abbruchabfälle der Fein- und Feinstfraktion, die in erheblichen Mengen beim Rückbau von Gebäuden entstehen und deponiert werden, vermieden. Das Vorhaben leistet somit einen wichtigen Beitrag in Bezug auf die Entwicklung von dringend benötigten, klimafreundlichen Baustoffen.

Die Ergebnisse zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Lehmbaustoffen aus RC-Materialien liefern einen Beitrag zur Einschätzung der Rückführbarkeit sekundärer Rohstoffe in den Stoffkreislauf. Die Feinfraktionen von Baurestmassen werden im Allgemeinen wegen der potenziell höheren Schadstofffracht als eher problematisch für eine Verwertung angesehen. Im Vorhaben wird gezeigt, wie mit einer vorgeschalteten gezielten Nassaufbereitung der Ausgangsmaterialien diese Vorbehalte ausgeräumt und hochwertige Baustoffe hinsichtlich sowohl der technischen Eigenschaften als auch der Umweltqualität produziert werden können. Das Abfallaufkommen ließe sich dadurch signifikant reduzieren, Deponieflächen entlasten und der Stoffkreislauf schließen.

Verbesserungsmöglichkeiten in der Durchführung von Elutionsversuchen speziell für Lehmbaustoffe können für die Normung abgeleitet und in den entsprechenden Ausschüssen im DIN und CEN berichtet werden.

Zudem sollen die Ergebnisse für die nächste Normengeneration zur Diskussion im Normenausschuss Lehmbau am DIN dienen, die für 2023 geplant ist.

Die angestrebte Baustoffentwicklung ermöglicht eine langfristige Sicherung von hochwertigen, energiearmen, mineralischen Bauprodukten, die wiederverwendbar (Lehmstein) oder bei sortenreiner Trennung, ohne großen energetischen Aufwand, endlos rezyklierbar sind (Lehmputz) bzw. am Ende des Lebenszyklus in den biologischen Kreislauf zurückgeführt werden können. Ökosysteme werden so langfristig gesichert.

Durch eine Steigerung der Ressourceneffizienz mittels Integration von Bau- und Abbruchabfällen lässt sich zudem die Ökobilanz von Lehmbaustoffen verbessern, da Eingriffe in den Naturhaushalt aber auch Energie für die Aufbereitung der Zusatzstoffe verringert werden können.

Für die beteiligten Lehmbaustoffhersteller können die Ergebnisse eine wichtige Grundlage für die industrielle Entwicklung von Lehmbaustoffen auf Basis von rezyklierten Bau- und Abbruchabfällen darstellen, die aufgrund der Schadstoffproblematik und der dafür notwendigen aufwendigen Untersuchungen wirtschaftlich nicht darstellbar ist.

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Durch die Entwicklung umweltfreundlicher, kreislaufgerechter, mineralischer Baustoffe, die sich durch eine annähernd vollständige Substitution von Primärrohstoffen, einen hohen Grad der Wiederverwendung bzw. der Rezyklierbarkeit und einen geringen Anteil an grauer Energie auszeichnen, lassen sich die negativen Umweltwirkungen des Bausektors in Bezug auf Abfallaufkommen, Ressourcenverbrauch, Emissionen, CO_2-Äquivalente, Eingriffe in den Natur- und Wasserhaushalt und Flächenverbrauch signifikant verbessern.

Die ressourceneffiziente Entwicklung von kreislauffähigen Baustoffen sorgt für eine langfristige Sicherung von Rohstoffen, da die entwickelten Baustoffe mit wenig grauer Energie in ihre

Einzelmaterialien zerlegt werden können und diese zukünftigen Generationen uneingeschränkt zur Verfügung stehen.

Das ist v. a. für die endliche Ressource Sand wichtig, deren Erschöpfung für den Bausektor für das Jahr 2080 vorausgesagt wird.

Der Einsatz von 100 % Rezyklaten und die 100 % Rezyklierfähigkeit reduziert signifikant die Flächeninanspruchnahme nicht nur in Bezug auf die Rohstoffgewinnung, sondern auch auf immer knapper werdende Deponieflächen.

Mit dem Projekt wird die Umsetzung der Ziele des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), der europäischen Abfallrahmenrichtlinie und des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) bezüglich Abfallvermeidung, Abfallrecycling, Ressourceneffizienz, Wiederverwendung, Umwelt- und Klimaschutz, Einsparung Deponieflächen vorangetrieben.

Die im Rahmen des Projektes angestrebte Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher Prinzipien haben Vorbildwirkung, die sich auf andere Stoffströme übertragen lassen, und haben das Potenzial, den Bausektor aus dem linearen Wirtschaftssystem in ein zirkuläres zu überführen.

Die Ergebnisse werden einem breiten Fachpublikum über Publikationen, Lehr- und öffentliche Veranstaltungen, einer Website und Ausstellung kommuniziert. Sie bilden zudem einen wichtigen Baustein in der Ausbildung der nächsten Generation Planer an der TU Berlin, um die Thematik des kreislaufgerechten Bauens stärker in Ausbildung zu verankern. Geplant sind auch Weiterbildungen von Architekten und Planern, u.a. an der Architektenkammer Berlin.

Forschungsdesign

Arbeitshypothesen

Rezyklierte mineralische Bau- und Abbruchabfälle der Fein- und Feinstfraktion (Korngrößen < 2 mm) eignen sich grundsätzlich zur Substitution natürlicher Gesteinskörnungen sowie des natürlichen Bindemittels Lehm für den Einsatz in industriell hergestellten Lehmbaustoffen wie Lehmsteinen und Lehmputzmörteln. Diese können bis zu einem Anteil von 80 % zugelassen werden.

Durch die Definition und Einhaltung von Gütekontrollwerten in Bezug auf Schadstoffgehalte und Verunreinigungen in mineralischen Bau- und Abbruchabfällen können gesundheitliche Beeinträchtigungen für zukünftige Gebäudenutzer aber auch negative Umweltwirkungen bei einer potenziellen Rückführung der Baustoffe in den natürlichen Kreislauf ausgeschlossen werden.

Durch die Aufbereitung von rezyklierten Bau- und Abbruchabfällen lässt sich eine effiziente und wirtschaftliche Nutzung der Rezyklate für den Einsatz in RC Lehmbaustoffen gewährleisten, die im Vergleich zu Produkten auf Basis von Primärrohstoffen eine Marktfähigkeit ermöglichen.

Durch die Substitution von Primärrohstoffen in Bezug auf Zusatzstoffe und Bindemittel lässt sich die Ökobilanz von Lehmbaustoffen verbessern. Ganzheitlich betrachtet fordern die Aufbereitung der rezyklierten Bau- und Abbruchabfälle oder andere Faktoren in der Prozesskette wie z. B. Transportwege nicht mehr graue Energie und verschlechtern somit nicht die Ökobilanz.

Methodischer Ansatz

Zur Darstellung projektrelevanter Rahmenbedingungen und Grundlagen wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Diese beinhaltet die Darlegung der gesetzlichen Anforderungen und Regelungen an RC Baustoffe sowie potenzielle Lücken. Zudem werden zentrale Fragen in Bezug auf zulässige Schadstoffgehalte im Ausgangsmaterial sowie baustoffbedingte Emissionen in die Raumluft im Detail betrachtet, da diese zum Teil maßgeblich für eine Zulassung in der Normung sind. Weiter werden die Stoffströme im Betonrecycling sowie die Sortiermehoden detailliert dargestellt. Abschließend werden die Anforderungen an Lehmbaustoffe dargelegt.

Um gewährleisten zu können, dass durch den Einsatz der entwickelten Recyclingbaustoffe keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen für Gebäudenutzer ausgehen, werden sowohl die Rezyklate als auch die entwickelten Lehmbaustoffe in Bezug auf potenzielle Schadstoffe untersucht. Dazu werden zum einen die rezyklierte Fein- und Feinstfraktion auf Schadstoffe im Feststoff (Metalle mit Königswasseraufschluss nach DIN EN 13657 [27] und ICP-Analytik nach DIN EN ISO 11885 [28] bzw. DIN EN ISO 17294-2 [29]; PAK mit Aufschluss nach DIN EN 16181/GC-MS [30]) sowie im Eluat (Säulen- o. Schüttelversuche nach DIN 19528 [15] / CEN TS 16637-3 [31] oder DIN 19529 [17]/DIN EN 12457-4 [18] beim Wasser-Feststoffverhältnis 2 l/kg bzw. 10 l/kg und entsprechende Eluatanalytik [28] [29] [32]) untersucht und mit Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung sowie den Anforderungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) (MV V TB, Tabelle A-2, Anhang A) abgeglichen.

Zudem werden die entwickelten Baustoffe in Bezug auf Schadstoffemissionen in die Raumluft in Emissionsprüfkammern nach EN 16516 [33] untersucht. Zur Abschätzung der potenziellen Genehmigungsfähigkeit bzgl. Innenraumlufthygiene werden Prüfungen in Anlehnung an die Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes (ABG) des DIBt durchgeführt, die in Anhang 8 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MV V TB) [20] veröffentlicht sind. Diese Untersuchungen betreffen vorrangig Emissionen flüchtiger organischer Komponenten (VOC). Mit Screeningversuchen wird jedoch zu Beginn das Ausgangsmaterial auf sein

Emissionspotenzial hinsichtlich relevanter schwerflüchtiger Schadstoffe, aber auch weiterer kritischer Stoffe, wie PAK, in Kleinprüfkammern untersucht.

Die Entwicklung von Materialrezepturen für zwei Lehmbaustoffe (Lehmstein, Lehmputzmörtel) werden anhand von Tastversuchen begonnen. Diese dienen dazu, ausgewählte Eigenschaften zu prüfen. Mittels labortechnische Untersuchungen an den entwickelten Baustoffen in Bezug auf die Einhaltung der mechanischen Anforderungen nach DIN 18945 und DIN 18947 sowie nach Lehmbau Regeln inkl. Sorptionsprüfungen nach DIN 18947 werden die Festigkeitseigenschaften sowie die hygroskopische Kapazität der Baustoffe bewertet [8] [10] [15]. In Tabelle 1 sind alle Proben aufgelistet. In AP 3 werden die einzelnen Proben beschrieben und in welcher zeitlichen Abfolge diese in das Projekt eingeflossen sind. Zunächst wurden alle Proben nach dem gleichen Schema der Arbeitspakete untersucht. Daraus wurden im späteren die Rezepturen entwickelt. Diese Mischungen sind mit „M2" und „M8" gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um die favorisierten Mischungen aus der mechanischen Untersuchung.

Um die Umweltwirkung der angestrebten Entwicklung ganzheitlich bewerten zu können, wird eine projektbegleitende Lebenszyklusanalyse (LCA) nach ISO 14044 erstellt [34].

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Proben mit Kurzbezeichnungen

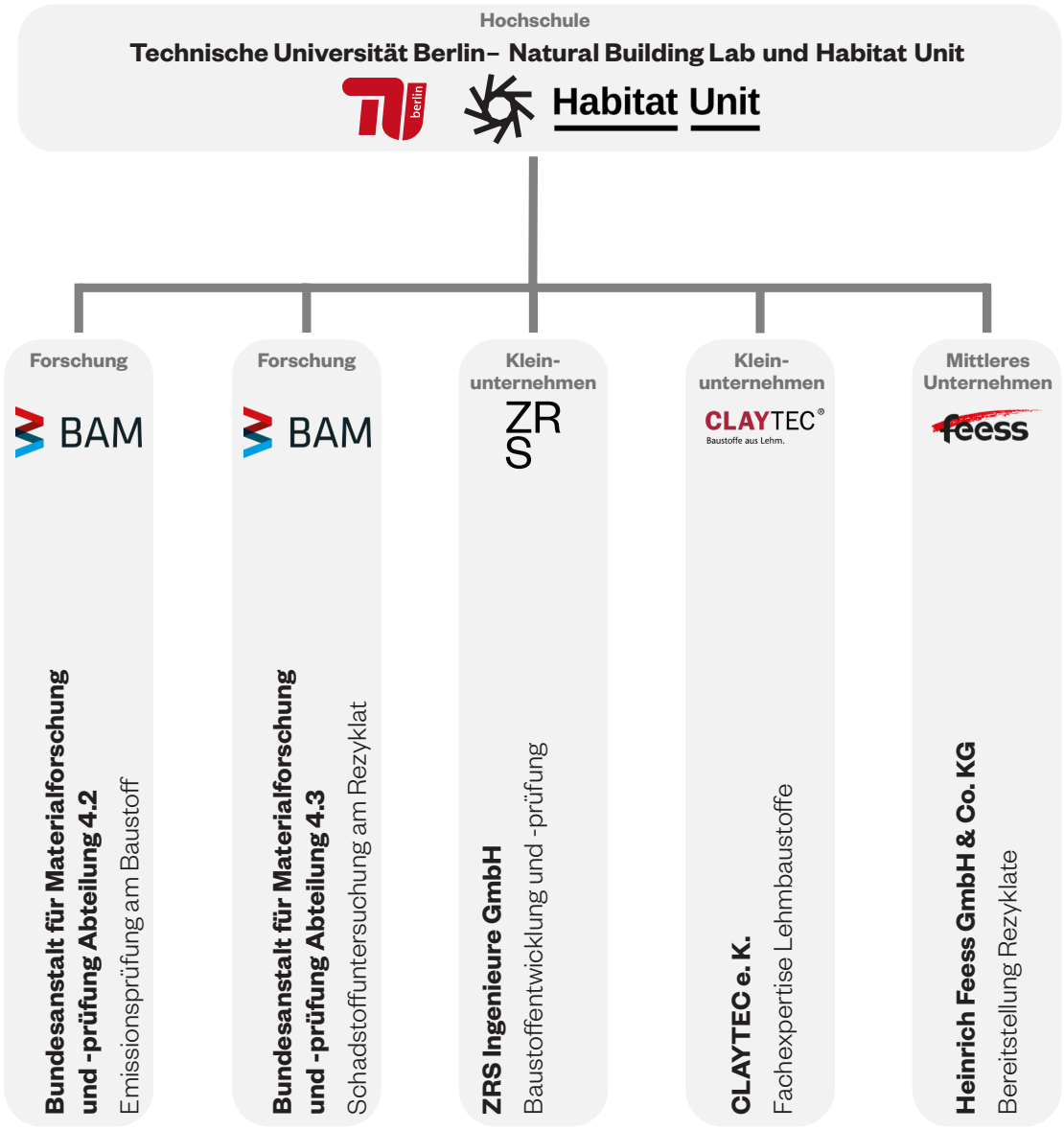
Kennzeichnung	Probenart
1.1	Betonsand 0/2
1.1a	Betonsand 0,25/2 mm
1.2	NKA-Sand 0/2 mm
1.3	Baustoffsand 0/2 mm
1.4a	Bodenaushub <0,25mm
1.4b	Bodenaushub 0,25-4mm
1.4c	Bodenaushub <4 mm
1.5	Betonsand carbonatisiert
1.6	Feinstgut
1.7	Betonbrechsand 0/2 mm
2.1	NKA-Schluff aus Boden
2.2	NKA-Schluff aus BO/BS -Gemisch
2.3	Naturbelassener Filderlehm
2.4	Steinfreier Boden ohne Kalk
2.5	Bodenaushub
M2	Lehmputzmischung
M8	Lehmputzmörtel 100%

Foto: NBL

Abbildung 7: Ausgangsmaterialien

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das interdisziplinäre Forschungskonsortium zeichnet sich durch eine Besetzung aus den Bereichen Wissenschaft und Forschung, Planung, Industrie, Baupraxis aus und setzt sich aus führenden Wissenschaftlern, Planern, Ingenieuren und Baustoffherstellern zusammen und schließt so die Lücke zwischen Forschung und Praxis.



Grafik: NBL

Abbildung 8: Organigramm

Arbeitspakete und Meilensteine

Das Projekt upMIN100 gliedert sich in sechs Arbeitspakete, die über einen Zeitraum von 24 Monaten strukturiert sind.

Das erste Arbeitspaket AP1 „Darstellung der Rahmenbedingungen & Grundlagen" untersucht projektrelevante gesetzliche Anforderungen, Regelungen und Stoffströme im Betonrecycling und Anforderungen an Sortierverfahren für Lehmbaustoffe.

Das zweite Arbeitspaket AP2 „Schadstoffanalyse von Ausgangsmaterial & Umgebungsluft" untersucht die Schadstoffgehalte des Ausgangsmaterials im Feststoff und Eluat. Über Screening-Tests für schwerflüchtige Stoffe (thermische Extraktion) werden Messungen der Luftschadstoffemissionen durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung verglichen.

Im Rahmen des dritten Arbeitspakets AP3 "Material- und Baustoffentwicklung und -prüfung" werden Baustoffprüfungen nach DIN 18945 und 18947 durchgeführt. Außerdem werden die Probekörper für Screening & Emissionstests und Demonstratoren der Produkte hergestellt.

Das vierte Arbeitspaket AP4 „Lebenszyklusanalyse", befasst sich mit der Erstellung einer Ökobilanzierung der Endprodukte.

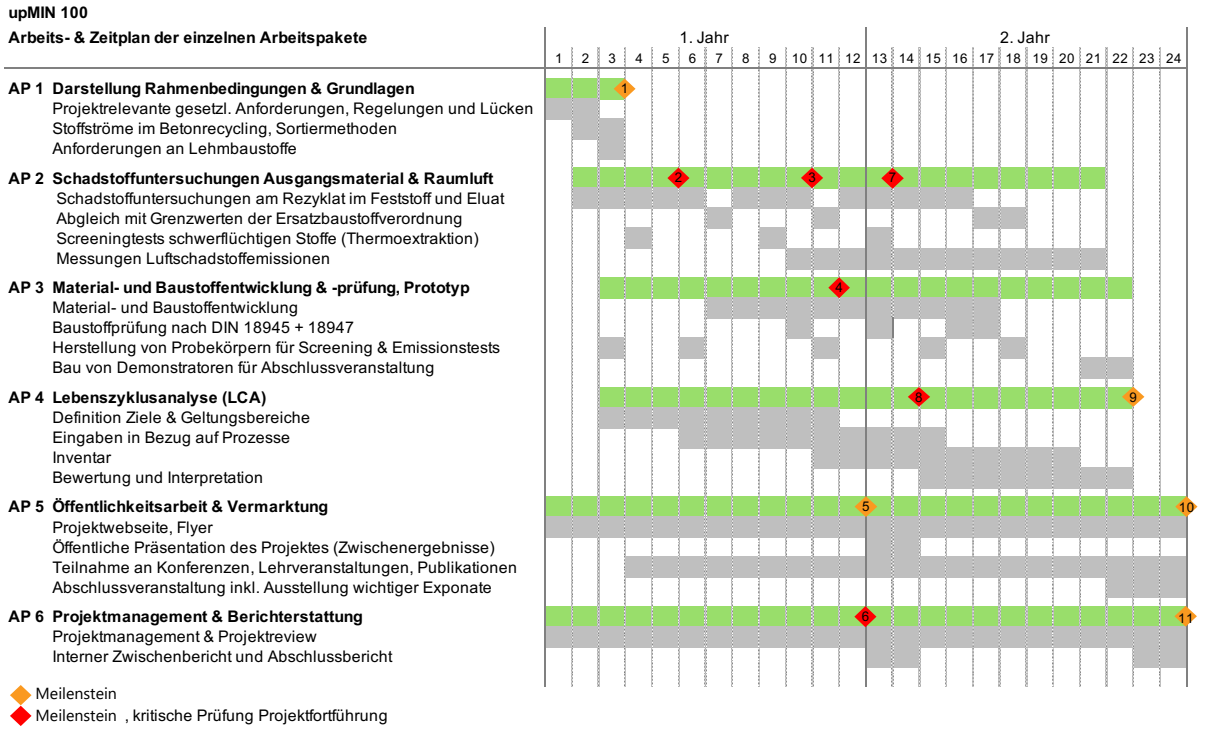
Das fünfte Arbeitspaket WP5 „Öffentlichkeitsarbeit & Marketing" befasst sich mit der gesamten Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung der Projektergebnisse. Auf einer eigenen Projektwebseite sollen die Forschungsergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Zum Abschluss des Projektes werden die Forschungsergebnisse in einem Flyer zusammengefasst, der auf Konferenzen und anderen Fachveranstaltungen physisch, aber auch digital über die Webseite verteilt werden kann.

Das sechste Arbeitspaket WP6 „Projektmanagement und Berichterstattung" beinhaltet das Projektmanagement und die Projektüberprüfung.

Tabelle 2: Arbeitspakete

Arbeitspakete	Beteiligte	Monate
AP 1 Darstellung projektspezifischer Rahmenbedingungen und rechtlicher Grundlagen	Alle Partner	3
AP 2 Untersuchungen des Ausgangsmaterials in Bezug auf Schadstoffe und Verunreinigungen sowie Untersuchungen der Baustoffe in Bezug auf zu erwartende Luftschadstoffemissionen	NBL, BAM, FES, HU, ZRSI	20
AP 3 Material- und Baustoffentwicklung und Prüfung, Herstellung von Probekörpern und Demonstratoren	NBL, CLAY, FES, HU, ZRSI	20
AP4 Lebenszyklusanalyse	Alle Partner	20
AP5 Öffentlichkeitsarbeit & Vermarktung	Alle Partner	24
AP6 Projektmanagement & Berichtertstattung	NBL, BAM, FES, HU, ZRSI	24

Abbildung 9 zeigt den detaillierten Arbeitsplan aus der Antragsphase inklusive der Darstellung der zeitlichen Abfolge und der Meilensteine.



Grafik: NBL

Abbildung 9: Detaillierter Arbeitsplan aus der Antragsphase

M1 Darstellung projektspezifischer Rahmenbedingungen u. rechtlicher Grundlagen: in M3 - Dokumentation > sollten wider Erwarten rechtliche Belange auftreten, die eine Durchführbarkeit des Projektes unmöglich machen, wird in M3 abgebrochen

M2 Definition von Gütekontrollwerten in Bezug auf Schadstoffe u. Verunreinigungen im Ausgangsmaterial: in M5 - Ergebnisse Literaturrecherche > sollte sich ergeben, dass die Gütekontrollwerte nicht zu den gewünschten Ergebnissen in Bezug auf M6 führen, werden diese strenger definiert

M3 Zwischenergebnisse Schadstoffuntersuchungen Bau- u. Abbruchabfälle: in M10 - Testergebnisse > sollten die angestrebten Grenzwerte für Schadstoffe im Ausgangsmaterial zu hoch und der technische Aufwand für eine Verbesserung aus wirtschaftlichen oder ökologischen Gründen unangemessen sein, wird in M10 abgebrochen

M4 Zwischenergebnisse Materialentwicklung u. -prüfung: in M11 - Testergebnisse > sollte die technische Umsetzung sich als zu aufwendig erweisen, wird in M11 abgebrochen

M5 Veranstaltung zur Projektkommunikation: in M12 - Organisation Veranstaltung > nicht relevant für Projektabbruch

M6 Projektreview: in M12 - Zwischenpräsentation > sollte der Projektfortschritt zu gering sein, sodass die Fertigstellung des Projekts unrealistisch erscheint, wird eine kostenneutrale Projektverlängerung diskutiert oder in M12 abgebrochen

M7 Zwischenergebnisse Screeningtests, Emissionsprüfungen: in M13 - Testergebnisse > sollte die Einhaltung der Grenzwerte nach AgBB unrealistisch erscheinen, wird die Lehmputzentwicklung in M13 abgebrochen, da dieser Baustoff im Innenraum eingesetzt wird

M8 Zwischenstand LCA: in M14 - Zwischenergebnisse > sollte die Ökobilanz deutlich schlechter sein als bei Lehmbaustoffen auf Basis von Primärrohstoffen, wird in M14 abgebrochen

M9 – M 11 führen nicht zum Projektabbruch

M9 Finale LCA: in M22 - Ergebnisse der Ökobilanz

M10 Abschlussveranstaltung: in M24 - Abschlussworkshop

M11 Abschlussbericht: in M24 - Abgabe Abschlussbericht

Projektverlauf

AP 1 – Darstellung Rahmenbedingungen & Grundlagen

Foto: feess

Abbildung 10: Nassklassierungsanlage der Firma feess in Kirchheim/Teck

UAP 1.1 – Projektrelevante gesetzliche Anforderungen

Begriffsdefinitionen RC-Gesteinskörnung

Gemäß DIN 4226-100:2002-02 ist eine rezyklierte Gesteinskörnung ein Sammelbegriff für rezyklierten Splitt (rezyklierte Gesteinskörnung > 4 mm) und rezyklierte Brechsande (rezyklierte Gesteinskörung ≤ 4 mm) und besteht aus aufbereitetem, anorganischem Material, welches bereits als Baustoff eingesetzt war [35]. Bei dem Aufbereitungsprozess werden mineralische Bau- und Abbruchabfälle aus Beton, Mauerwerk, Dachziegel etc. mehrstufig gebrochen und in Korngrößen klassiert. Je nach Anwendungsgebiet unterliegen die Gesteinskörnungen den gleichen Regelwerken und Anforderungen wie Kies oder gebrochener Naturstein und sind entsprechend gütegesichert.

Die Anwendungsgebiete von rezyklierten Gesteinskörnungen im Hochbau beschränken sich überwiegend auf die Herstellung von Recycling- oder R-Beton sowie Mauerwerksziegel. Diese substituieren aus Gründen der Ressourcenschonung, des Umweltschutzes, aber auch der Reduktion der grauen Energie Gesteinskörnungen auf Basis von Primärrohstoffen. Je nach Anteil der Bestandteile werden in der DIN 4226-101 vier Typen von rezyklierten Gesteinskörnungen unterschieden [35] [36].

- Typ 1: Betonsplitt, Betonbrechsand
- Typ 2: Bauwerksplitt/Bauwerksbrechsand
- Typ 3: Mauerwerkssplitt/Mauerwerkbrechsand
- Typ 4: Mischsplitt/Mischbrechsand

Tabelle 3: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen [35]

Bestandteile	Zusammensetzung Massenanteile in Prozent			
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	≥ 90	≥70	≤ 20	≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	≤ 80	
Kalksandstein			≤ 5	
Andere mineralische Bestandteile[a]	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile[b]	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1

a Andere mineralische Bestandteile sind zum Beispiel: porosierter Ziegel, Leichtbeton, Porenbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacke, Bimsstein.
B Fremdbestandteile sind zum Beispiel: Glas, Keramik, NE-Metallschlacke, Stückgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, sonstige Stoffe.

Bislang beschränken sich die zugelassenen Rezyklate auf Korngrößen > 2mm.

Um den Einsatz von Rezyklaten mit Korngrößen < 2 mm in Lehmbaustoffen zu ermöglichen wurden in einem ersten Schritt die geltenden Anforderungen in Bezug auf die stoffliche Beschaffenheit für rezyklierte Gesteinskörnungen für die Herstellung von RC Betonen und RC-Mörteln analysiert und mit den Anforderungen für die zu entwickelnden Lehmbaustoffen verglichen und entsprechend verschränkt. Im Ergebnis wurden die folgenden, allgemeinen Anforderungen identifiziert, die im weiteren Projektverlauf im Rahmen der Schadstoffuntersuchungen sowie der Materialentwicklung überprüft und weiter spezifiziert wurden:

- geometrische Anforderungen
- physikalische Anforderungen
- chemische Anforderungen
- Anforderungen an die Kornrohdichte
- Anforderungen an die Wasseraufnahme
- Gehalt an Chloriden, anzugeben in M.%
- Gehalt an Sulfaten, anzugeben in M.%
- Gehalt an Nitraten, anzugeben in M.%
- Raumbeständigkeit
- Frostwiderstand
- Grenzwerte für die im Eluat sowie im Feststoff ermittelten Parameter

Ferner schreibt die DIN EN 12620 vor, dass nur rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden dürfen, die keine umweltschädlichen Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser haben, wobei der Nachweis durch die Festlegungen gemäß Bauregelliste B, Teil 1, zu führen ist [12].

Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen in Bezug auf Schutz von Boden und Wasser

Bauprodukte und deren Bestandteile können während aller Lebenszyklusphasen die ein Gebäude durchläuft, sowohl das Grundwasser als auch den Boden in der Umgebung des Bauwerks beeinflussen. Deshalb müssen Bauprodukte in Bezug auf ihr Potenzial, was von ihnen ausgeht, eine schädliche Bodenveränderung oder eine schädliche Veränderung der Beschaffenheit des Grundwassers

hervorzurufen, bewertet werden. Auch wenn das vor allem Produkte für bauliche Anlagen betrifft, die im Bereich der Gründung angesiedelt sind, so ist dieses auch für Lehmbaustoffe relevant, da diese am Ende des Lebenszyklus entweder wiederverwendet, wiederverwertet oder in den biologischen Kreislauf zurückgegeben werden können [35].

Die rezyklierten Gesteinskörnungen, die zur Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen verwendet werden müssen daher Eigenschaften aufweisen, die es ermöglichen, daraus Lehmbaustoffe herzustellen, von denen unter den Bedingungen, unter denen sie eingebaut werden, in absehbarer Zeit weder ein Grundwasserschaden noch schädliche Bodenveränderungen ausgehen können und die nicht zu einer Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf führen (§7 KrWG).

DIN 4226-100 legt sowohl für das Eluat der rezyklierten Gesteinskörnungen sowie für die im Feststoff ermittelten Parameter Höchstwerte fest, die in Tabelle 4 angegeben sind [35]. Diese Grenzwerte wurden vorerst als maßgeblich für die in AP2 geführten Schadstoffuntersuchungen angesetzt. Im weiteren Verlauf wurden dann weitere Höchstwerte herangezogen, die am Ende dieses UAP dargestellt sind.

Tabelle 4: Höchstwerte der zu bewertenden Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen [35]

Eigenschaft	Höchstwerte	Analyseverfahren
Eluat		
pH-Wert	12,5[a]	DIN 38404-5
Elektrische Leitfähigkeit	3 000[a] µS/cm	DIN EN 27888
Chlorid	150 mg/l	DIN 38405-1
Sulfat	600 mg/l	DIN 38405-5
Arsen	Arsen 50 µg/l	DIN EN ISO 11885 DIN EN ISO 11969
Blei	100 µg/l	DIN 38406-6 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Cadmium	5 µg/l	DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Chrom gesamt	100 µg/l	DIN 38406-2 DIN EN ISO 11885
Kupfer	200 µg/l	DIN 38406-7 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Nickel	100 µg/l	DIN 38406-11 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Quecksilber	2 µg/l	DIN EN 1483
Zink	400 µg/l	DIN 38406-8 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885

Phenolindex	100 µg/l	DIN 38409-16
Feststoff		
Kohlenwasserstoffe (H18)	1 000 mg/kg	DIN 38409-18
PAK nach EPA	75 mg/kg	Soxhlethextraktion 3 h mit Cyclohexan, Analyse des Extraktes analog U.S. EPA 610
EOX	10 mg/kg	DIN 38414-17
PCB	1 mg/kg	DIN 38414-20

a Kein Ausschlusskriterium

Anforderungen an Bauprodukte

Für die Verwendung von Bauprodukten in Deutschland liegen auf nationaler und europäischer Ebene die folgenden Gesetze und Verordnungen vor, die für die Entwicklung von Lehmbaustoffen auf Basis von Bau- und Abbruchabfällen relevant sind:

- Europäische Bauproduktenverordnung (BauPVO)
- Europäische Chemikalienverordnung REACH
- POP Verordnung (zum Schutz vor persistenten organischen Stoffen)
- Europäische und nationale Biozidverordnung
- Nationale Chemikalienverbotsverordnung
- Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) des DIBt (Anhang 8: AgBB Schema)
- Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser (DIBt 2011)
- Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 11. Juni 2021 (Relevanter Teil: Ersatzbaustoffe als Orientierung)

Anhang 8 der MVV TB, welcher die Bewertung von VOC-Emissionen aus bestimmten Bauproduktgruppen in die Innenraumluft regelt, sowie die Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser des DIBt können aufgrund ihrer inhaltlichen Ausrichtung eine maßgebliche Relevanz für die Entwicklung der Lehmbaustoffe auf Basis von Rezyklaten haben und wurden im Projektverlauf angewendet.

Anforderungen an Bauprodukte in Bezug auf Emissionen in die Raumluft

Bauprodukte für Innenräume, wie beispielsweise Innenputze, können gesundheitlich bedenkliche Stoffe wie flüchtige organische Verbindungen (VOC) in die Raumluft emittieren. Da diese wesentlich zur Belastung der Innenraumluft beitragen können, wurden an solche Bauprodukte Anforderungen festgelegt, die in der Musterbauordnung (MBO 2016) sowie der neuen Musterverwaltungsvorschrift MVV TB (Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes (ABG), 2020) verankert sind [37]. Um deutschlandweit eine Grundlage für eine einheitliche, gesundheitliche Bewertung zu schaffen, hat der Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) Prüfkriterien und

Bewertungsmaßstäbe erarbeitet, die den ABG in der MVV TB zugrunde liegen. Diese sind in ein Bewertungsschema für VOC-Emissionen eingeflossen, das sicherstellen soll, dass von Bauprodukten keine gesundheitsgefährdenden Emissionen ausgehen, aber auch keine unzumutbaren Belästigungen durch Gerüche entstehen. Für bestimmte Produkte, wie z. B. Oberflächenbeschichtungen, ist die Prüfung nach dem AgBB Schema verpflichtend, um eine Zulassung des Produktes beim Deutschen Institut für Bautechnik zu erwirken. Als Bewertungsgrundsatz für die Emissionen aus Bauprodukten wird die toxikologische Bedeutung der Einzelstoffe berücksichtigt. Zudem werden mit dem AgBB Schema gesundheitsbezogene Qualitätsmaßstäbe für die Herstellung und die Verwendung von Bauprodukten für Innenräume gesetzt. So soll die Entwicklung emissionsarmer Bauprodukte gefördert werden.

Das AgBB Schema beinhaltet die folgenden Kriterien:

- TVOC (Gesamt-VOC): Summe der Konzentration aller Einzelsubstanzen, wenn die Konzentration 5 µg/m^3 übersteigt innerhalb des Retentionsbereichs C6–C16. Der TVOC darf 1.000 µg/m^3 am 28. Probenahmetag nicht überschreiten
- ΣSVOC: Summe der Konzentration aller Einzelsubstanzen, wenn die Konzentration 5 µg/m^3 übersteigt innerhalb des Retentionsbereichs > C16– C22. Der ΣSVOC darf 100 µg/m^3 am 28. Probenahmetag nicht überschreiten
- Kanzerogene Stoffe der EU-Kategorien 1A und 1B dürfen eine Konzentration von 1 µg/m^3 nicht überschreiten
- Bewertbare Stoffe: Alle VOCs mit einem NIK-Wert (Niedrigste Interessierende Konzentration); diese Stoffe sind im Anhang des Bewertungsschemas gelistet und müssen mit ihren spezifischen Responsefaktoren quantifiziert werden; R ≤ 1
- Nicht bewertbare Stoffe: Summe aller nicht identifizierbaren VOCs und mit unbekannten NIK. Sie werden über Toluoläquivalente quantifiziert und dürfen am 28. Probenahmetag eine Konzentration von 100 µg/m^3 nicht überschreiten

Der sogenannte R-Wert (Quotient aus ermittelter Stoffkonzentration und gelistetem NIK-Wert) wird aus den gemessenen Konzentrationswerten der bewertbaren Stoffe am 28. Probenahmetag berechnet oder früher, wenn die Prüfung vorzeitig beendet wird. Er ist ein dimensionsloser Summenparameter, der nicht größer als 1 sein darf.

Um eine Belastung der entwickelten Lehmbaustoffe auf die Raumluftqualität ausschließen zu können, sollen diese im Hinblick auf Schadstoffemissionen in die Raumluft untersucht und nach AgBB Schema bewertet werden.

Umweltzeichen

Umweltzeichen wie der Blaue Engel oder natureplus legen anspruchsvolle Anforderungen an schadstoff- und emissionsarme Bauprodukte fest. Die folgenden Anforderungen nach Blauer Engel sowie natureplus wurden für die Entwicklung von upMIN100 RC Lehmbaustoffen geprüft, die neben dem AgBB Schema weitere Kriterien festlegen:

Blauer Engel
Die vier zentralen Schutzziele des Umweltlabels Blauer Engel sind wie folgt:

- Gesundheit
- Klima
- Ressourcen
- Wasser

Als Grundlage für die Bewertung von Bauprodukten gemäß Blauer Engel dient das oben erläuterte AgBB Schema des Ausschusses zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten.

Für Innenputze definiert der Blaue Engel die Einhaltung der folgenden Anforderungen:

- gesetzliche Regelungen zum europäischen und deutschen Chemikalienrecht
- REACH-VO Anhang XIV und XVII
- POP-VO Anhang I
- EChemVerbotsV
- GefStoffV
- Industrieemisions-RL
- BImSchV
- Biozidprodukte-VO
- CLP-VO

Darüber hinaus dürfen Innenputze keine Stoffe mit folgenden Eigenschaften als Bestandteile enthalten:

- besonders besorgniserregende Stoffe nach REACH
- krebserregende Stoffe der Kategorie Carc.1A oder Carc.1B
- keimzellmutagen der KategorieMuta.1A oder Muta.1B
- reproduktionstoxisch der Kategorie Repr. 1A oder Repr. 1B
- akuttoxisch der Kategorie AcuteTox.1, AcuteTox.2
- toxisch für spezifische Zielorganeder Kategorie STOTSE.1, STOTRE.1
- gewässergefährdend der Kategorie Aquatic Acute 1, Aquatic Chronic 1 oder Aquatic Chronic 2

Zudem sollen die oben dargelegten nach AgBB definierten Grenzwerte für VOC Emissionen eingehalten werden [38].

natureplus

natureplus hat mit der Richtlinie 5010 für emissionsarme Bauprodukte Grundsätze für eine natureplus-Zertifizierung festgelegt, die für die Bewertung von Emissionen aus Bauprodukten die folgenden Aspekte, Einstufungen und Regelwerke zu Grund legt [39]:

- das Minimierungsgebot
- ein vorbeugender Gesundheitsschutz / das Vorsorgeprinzip
- die Innenraumrichtwerte des Umweltbundesamtes
- die Einstufung gemäß TRGS 905/907, DFG-MAK-Liste, EU-Verordnung 1272/2008 und IARC-Klassifizierung
- das deutsche Regelwerk zur Bewertung von VOC-Emissionen aus Bauprodukten, das AgBB-Schema

Für das Forschungsvorhaben wurde geprüft, inwieweit die Richtlinien RL0803 Lehmputzmörtel und RL1006 Lehmplatten maßgebend sind. Darüber hinaus sind für die Zertifizierung folgende Richtlinien relevant:

- RL5001 Chemikalienrichtlinie
- RL5003 Naturschutz beim Abbau mineralischer Rohstoffe
- RL5004 Transparenz und soziale Verantwortung
- RL5010 Emissionsarme Bauprodukte
- RL5020 Klimaverträglichkeit und Energieeffizienz

In den o.g. Richtlinien werden entsprechende Grenzwerte zu möglich auftretenden Schadstoffen definiert. Die Herkunft der Grenzwerte bleibt allerdings unklar. Zudem beruhen die Grenzwerte auf einem Gesamtaufschluss mittels Flusssäure. Hier besteht keine Vergleichbarkeit zu Feststoffwerten der Mantelverordnung, da darin Königswasseraufschlüsse aus arbeitsschutz- und umweltschutztechnischen Gründen bevorzugt werden. Der Aufschluss von Elementen aus der Silikatmatrix ist zudem für die Bewertung der Umweltverträglichkeit nicht relevant.

Potenzielle Lücken in der Gesetzgebung für Schadstoffgrenzwerte bezüglich Gesundheits- und Umweltverträglichkeit

Grundsätzlich sollten gefährliche Stoffe für Mensch und Umwelt nicht in Bauprodukten enthalten sein. Die Praxis zeigt, dass dieser Grundsatz aus technischen Gründen nicht immer erfüllt ist. Im Rahmen der Recherche wurden die folgenden Lücken in der Gesetzgebung bezüglich Gesundheits- und Umweltverträglichkeit identifiziert.

Ü-Zeichen

Das Ü-Zeichen, das die freie Verwendbarkeit von Bauprodukten in Deutschland ermöglicht, regelt die Anforderungen bezüglich der gesundheitlichen Bewertung nicht oder nur eingeschränkt [40]. Da die vollständige Deklaration der gesundheits- und umweltgefährdenden Inhaltsstoffe bislang nur auf freiwilliger Basis erfolgt, ist diese für viele Bauprodukte nicht verfügbar.

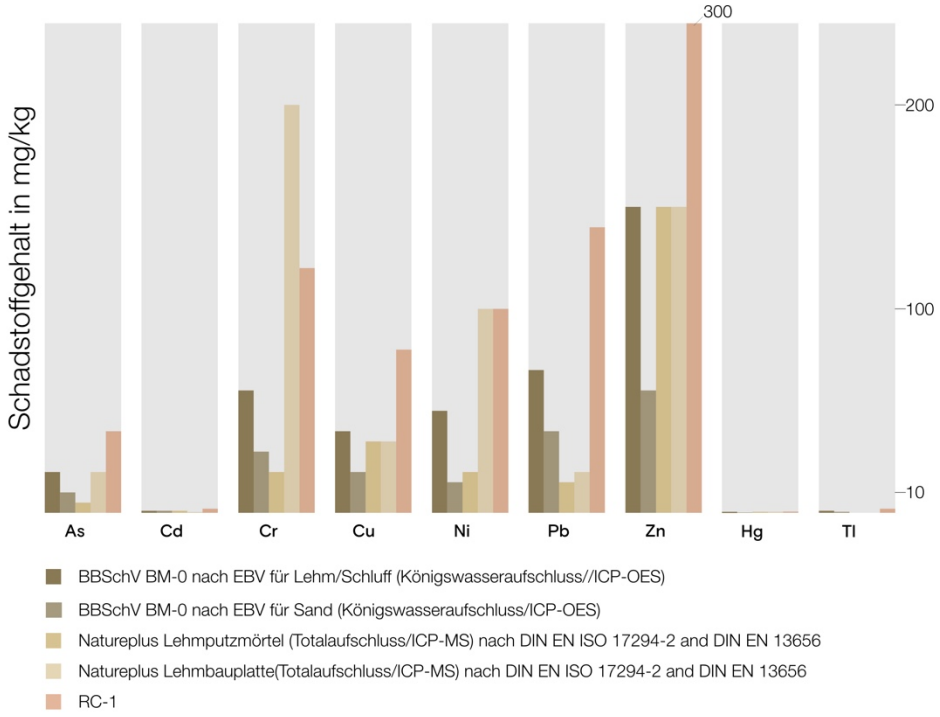
MAK- und NIK-Werte

VOC-Emissionen können sich in Innenräumen anreichern bzw. reagieren erst in Kombination mit Emissionen aus anderen Produkten, die sich im Raum befinden. Die zulässigen Konzentrationen gemäß MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration) oder NIK (niedrigste interessierende Konzentration, z. B. für Wohnräume) regeln bisher nicht alle Problemstoffe. Für Rezepturen, die neue Stoffe enthalten, fehlen oftmals jegliche Regelungen.

Grundsätzlich ist es daher empfehlenswert, schadstoffarme Produkte einzusetzen. Dass es sich bei Lehmbaustoffen um Bauprodukte handelt, bei denen die Kund:innen einen besonderen Wert auf gesundheitliche und ökologische Aspekte legen, wird diesem Aspekt besonders Rechnung getragen und potenzielle Schadstoffe, die in den Rezyklaten identifiziert werden, auf ein Minimum reduziert.

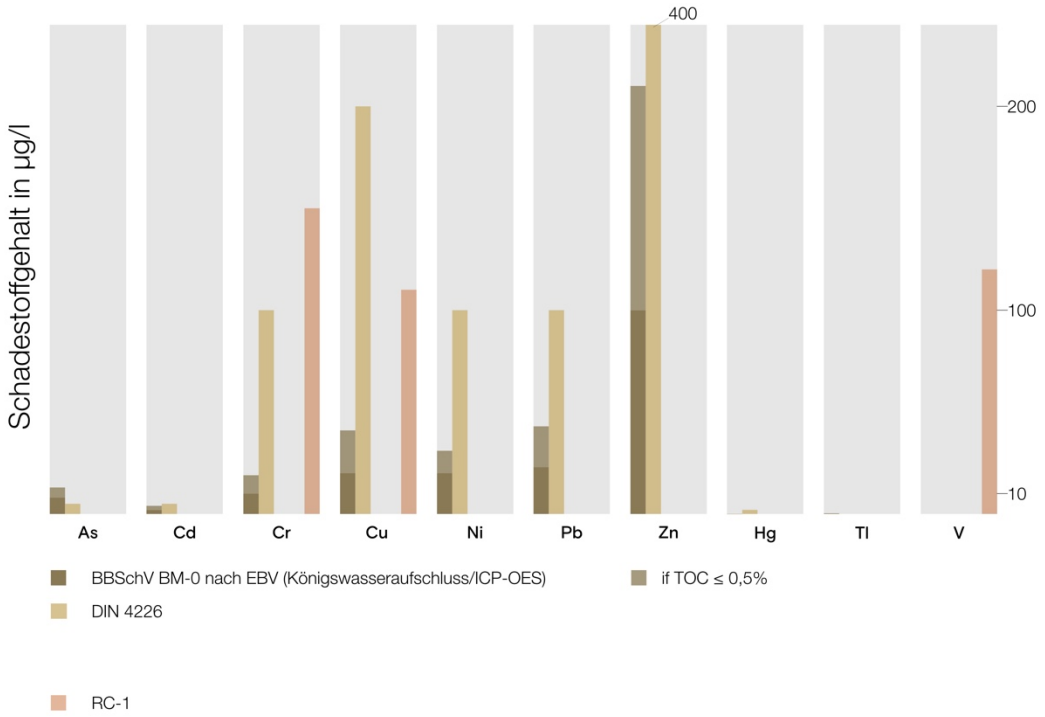
Zusammenfassung Grenzwerte

Im Projekt wurden unterschiedliche Grenzwerte verschiedener Parameter untersucht. Neben den Grenzwerten für Schwermetalle im Feststoff und Eluat wurden Grenzwerte für PAK und bauschädliche Salze betrachtet. Dabei wurden unterschiedliche Benchmarks betrachtet. Für das Projekt wurde für die Bewertung aller Materialien „BM-0" (unbelastetes Bodenmaterial) für Lehm/Schluff angesetzt. Dies hat den Hintergrund, dass der fertige Baustoff uneingeschränkt wiederverwendet werden kann.



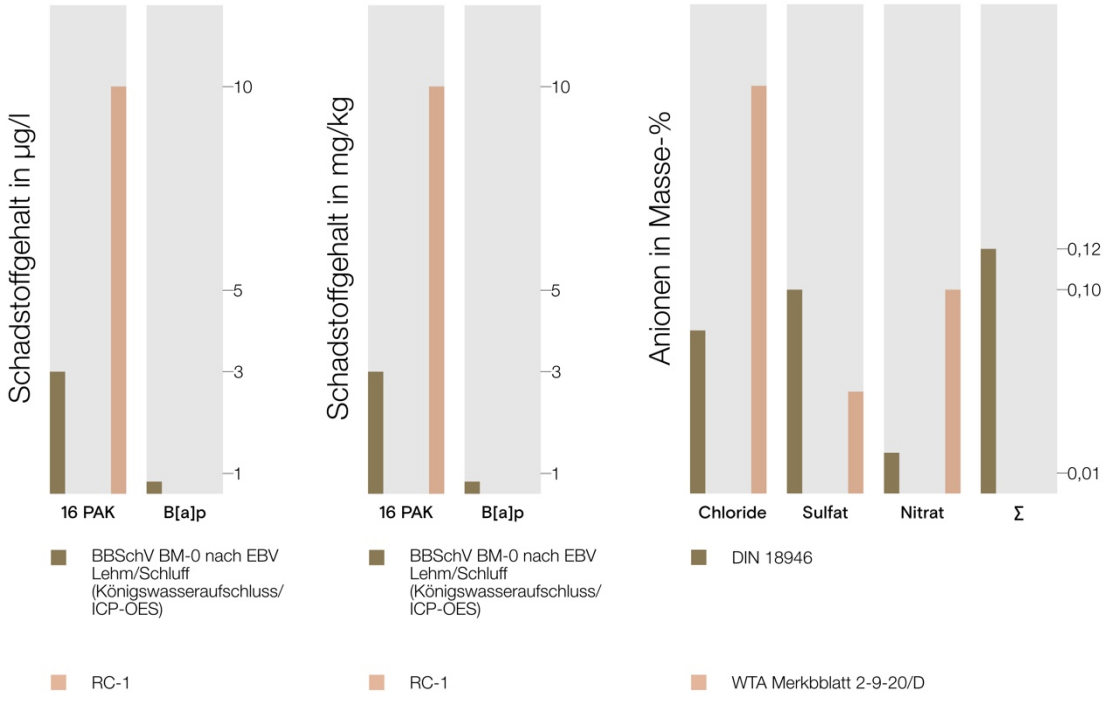
Grafik: NBL

Abbildung 11: Grenzwerte Feststoff



Grafik: NBL

Abbildung 12: Grenzwerte Eluat



Grafik: NBL

Abbildung 13: Grenzwerte PAK Eluat und Feststoff und bauschädliche Salze

UAP 1.2 – Stoffströme

In Deutschland werden Abfälle durch das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrGW) definiert. Abfälle werden durch den Entledigungswillen ihrer Besitzer:innen zu solchen. Dabei wird zwischen Abfällen, die verwertet werden, und Abfällen, die nicht verwertet werden, unterschieden (vgl. KrWG §3 (1)) [41]. Laut dem Bericht Kreislaufwirtschaft Bau sind 2018 in Deutschland ca. 218,8 Mio. t mineralische Bauabfälle erfasst worden [42]. Die für das Vorhaben relevanten RC-Baustoffe finden sich vorwiegend unter den Abfallschlüsseln 17 01 01 für Beton, 17 01 02 für Ziegel und 17 05 04 für Boden und Steine wieder. Das Recycling-Unternehmen Heinrich Feess GmbH & Co. KG (feess) nimmt sich solcher Stoffe an. Dabei werden nur selektiv rückgebaute Materialien angenommen, die keine Störstoffe wie z.B. Kunststoffe, Dämmstoffe o.ä. enthalten und die bestimmte Grenzwerte für Schadstoffe einhalten. Eine entsprechende Rückbaustrategie mit getrenntem Rückbau der unterschiedlichen Abfallfraktionen wird demnach vorausgesetzt.

Grafik: NBL

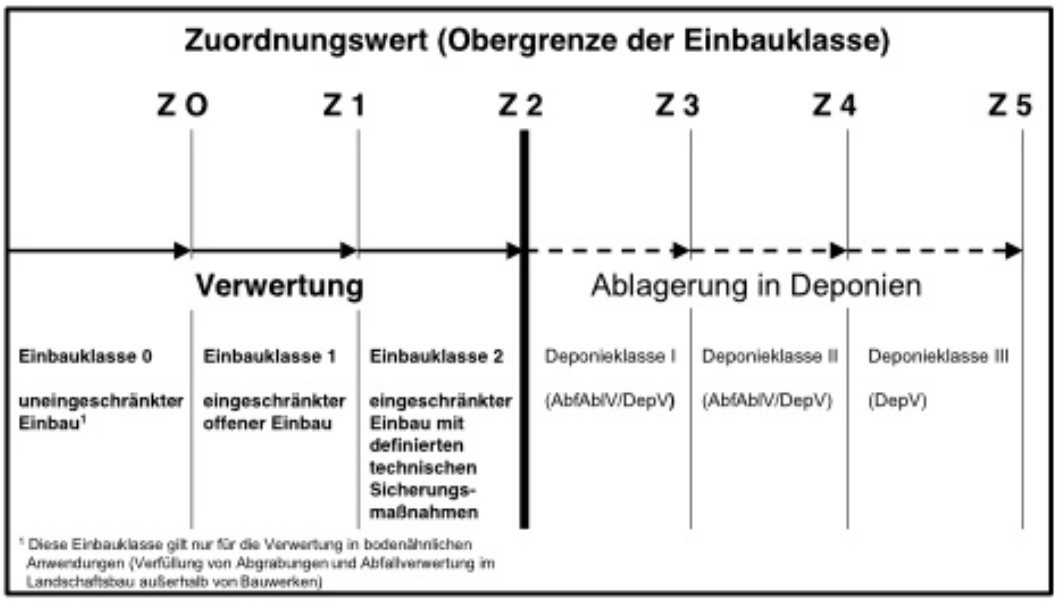
Abbildung 14: Darstellung der Stoffströme

Tabelle 5: Abfallschlüssel gem. Abfallverzeichnisverordnung

Bauschutt	
17 01 01	Beton
17 01 02	Ziegel
17 01 03	Fliesen, Ziegel und Keramik
17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen die unter 17 01 06 fallen
Straßenaufbruch	
17 03 02	Bitumengemische mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 03 01 fallen
Boden und Steine	
17 05 04	Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen
17 05 06	Baggergut mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 05 05 fällt
17 05 08	Gleisschotter mit Ausnahme desjenigen, der unter 17 05 07 fällt
Bauabfälle auf Gipsbasis	
17 08 02	Bauabfälle auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 08 01 fallen
Baustellenabfälle	
17 02 01	Holz
17 02 02	Glas
17 02 03	Kunststoff
17 04	Metalle (einschließlich Legierungen) außer solchen, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind und außer Kabeln, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten (ausgenommen 17 04 09 und 17 04 10)
17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01 und 17 06 03 fällt
17 09 04	Gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) unterscheidet verschiedene Einbauklassen für Materialien und stellt diese in den „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen

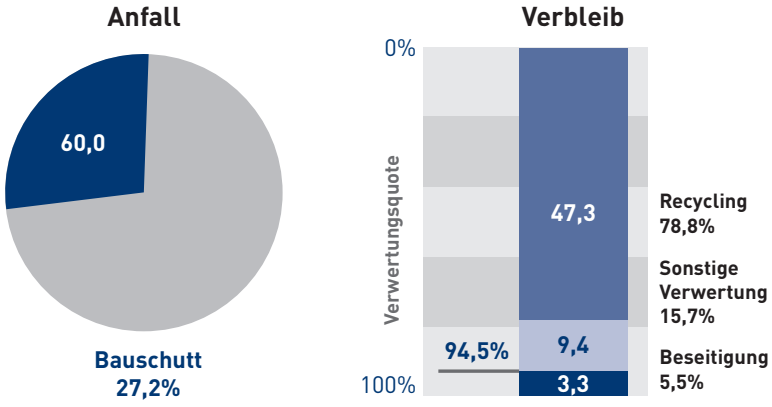
Reststoffen/Abfällen“ zusammen. [43] Mit Einführung der Ersatzbaustoffverordnung, die im August 2023 Inkraft getreten ist, gibt es abweichend von den alten Zuordnungswerten nun neue Einstufungen. [44]



Grafik: LAGA

Abbildung 15: Darstellung der Einbauklassen nach Mitteilung 20 der LAGA

Bei den Produkten werden unterschiedliche Aufbereitungsmethoden angewendet. Mit der Nassklassierung können die Baustoffe in verschiedene Korngrößen getrennt werden. Somit entstehen Korngrößenverteilungen für unterschiedliche Anforderungen und Einsatzgebiete. Bei der Nassklassierung wird ein Flockungsmittel eingesetzt, um die Feinstanteile von den Fraktionen > 2 mm lösen zu können. Der Einsatz dieser Mittel wirft die Frage auf, ob die Bindekraft der Produkte dauerhaft beeinflusst bleibt. Die Verfahrenstechniken werden in AP 4 detailliert beschrieben. Durch die Bearbeitung der Aufgabematerialien kann der Zuordnungswert verbessert werden, was auf eine Aufkonzentration der Schadstoffe im Feinstanteil rückschließen lässt.



Grafik: 13. Monitoring-Bericht, Kreislaufwirtschaft Bau (2020)

Abbildung 16: Anfall und Verbleib der Fraktion Bauschutt in Mio. t

Von den anfallenden 60 Mio. t Bauschutt, welche 27,2 % der mineralischen Bauabfälle ausmachen, werden bisher 78,8 % recycelt. Ein Großteil dieser Recyclingbaustoffe wird derzeit im Straßenbau verwendet. Die Stoffkreisläufe lassen sich in ein quasistationäres System einordnen, in dem der Input an Material sehr stark vom Output abweicht [43]. Obwohl die Verwendungsquote sehr hoch erscheint, muss im Sinne einer kreislaufgerechten Zukunft das Potenzial weiter ausgeschöpft werden, um die Entnahme von Primärressourcen zu reduzieren.

UAP 1.3 – Anforderungen an Lehmbaustoffe

Aus DIN 18945 für Lehmsteine ergeben sich Anforderungen an die Festigkeitsklassen und Anwendungsklassen, die die Feuchte- und Frostresistenz der Lehmsteine beschreibt. Die Feuchte- und Frostresistenz wird durch das Herstellungsverfahren und die Beimengung faserhaltiger Zusatzstoffe bestimmt. Dies ist also unabhängig von den vorhabenbedingten Voraussetzungen. Die Festigkeit von Lehmsteinen wird im Wesentlichen von der Bindigkeit des Baulehms bestimmt. Angestrebt werden sollte die Festigkeitsklasse 2, die die Mindestdruckfestigkeit für tragend eingesetzte Lehmsteine darstellt.

Die Mindestdruckfestigkeit für nicht-lastabtragende Lehmsteine liegt bei 1 N/mm² und damit bei der Hälfte der Mindestdruckfestigkeit für tragend eingesetzte Lehmsteine. Da dies der einzige bei Lehmsteinen zu prüfende Festigkeitsparameter ist, besteht hier keine Alternative. Bei den Eigenschaften, die die Einstufung in die Anwendungsklasse (Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit) bestimmen, sollte man den Kontaktversuch auswählen. Der Kontaktversuch ist der maßgebende Versuch für die Anwendung im Innen- und konstruktiv witterungsgeschützten Außenbereich (Anwendungsklasse AK II). Diese Anwendungsklasse wird als realistisch angesehen und der dafür maßgebende Kontaktversuch simuliert den Feuchteeintrag infolge Putzauftrag der Putzdicke von 1,5 cm. Die Feuchtemenge wird auf eine auf der Lehmsteinsichtfläche aufgelegten Zellulosekompresse gegeben. Es dürfen sich keine sichtbaren Quellverformungen und Rissbildungen ergeben.

Hinsichtlich der vorhandenen oder potenziellen Gehalte an bauschädlichen Salzen in den Rezyklaten müssen die Lehmsteine auf den Gehalt an bauschädlichen Salzen geprüft und mit den Anforderungswerten der DIN 18945 verglichen werden. Die Testung kann im Rahmen der Tast- und Vorversuche durch eine optische Prüfung der Lehmsteinoberflächen (weißliche Belege) ersetzt werden.

Aus DIN 18947 für Lehmputzmörtel ergeben sich Anforderungen an die Festigkeitsklasse. Für normal genutzte Räume sollen Lehmputze der Festigkeitsklasse S II verwendet werden. Die Festigkeit von Lehmputz wird im Wesentlichen von der Bindigkeit des Baulehms bestimmt. Im Rahmen der Vorversuche sollte von den vier Festigkeitsparametern, die die Einstufung in die Festigkeitsklasse zulassen (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Haftfestigkeit und Abriebfestigkeit) die Druckfestigkeit ausgewählt werden. Weitere maßgebende Eigenschaft ist das Schwindmaß, welches bei zu hohen Werten zu Rissbildungen und Ablösungen des Putzes vom Putzgrund führen würde. Die Testung dieser Eigenschaft kann nicht durch einfachere Versuche ersetzt werden und ist deshalb alternativlos bereits im Rahmen der Vorversuche durchzuführen.

Anzustreben ist bei der fakultativ zu prüfenden Eigenschaft der Wasserdampfsorption die Wasserdampfsorptionsklasse WS III, der heute alle maßgeblichen handelsüblichen Produkte entsprechen.

AP 2 – Schadstoffuntersuchungen Ausgangsmaterial & Raumluft

UAP 2.1 – Schadstoffuntersuchungen am Rezyklat im Feststoff

Die Proben (s. Tabelle 1) wurden zur Erzielung der Rieselfähigkeit luftgetrocknet, homogenisiert und repräsentativ in für die jeweiligen Analysen benötigte Teilproben mittels Drehrohrprobenteiler aufgeteilt. Bei stark bindigen Materialien wurde die Probenteilung durch mehrfaches Pressen in eine plattige Form und Segmentieren bis zur benötigten Probenmasse erzielt. Die Proben zur Bestimmung von pH-Wert, Korndichte, Glühverlust, Carbonatgehalt, Elementen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse und Königswasser-Auszug sowie PAK-Feststoffgehalt wurden zusätzlich gemahlen. Soweit die Proben rieselfähig waren, wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN 13139 mittels Trockensiebung bestimmt. Drei Proben mussten für die Korngrößenanalyse zur Auflösung von Aggregaten zuvor gefriergetrocknet werden (2.3, M2 und M8).

Ergebnisse

Spezifische Grenzwerte für Schadstoffgehalte in Lehmbaustoffen existieren nicht (Ausnahme: bauschädliche Salze). Tabelle 6 und

	1.4b	1.4c	1.6	1.7	1.5	2.5	M2	M8
Summe 16 PAK	0,1506	0,1136	2,0565	0,8947	2,4351	0,4858	0,562	0,931
Naphthalin	0,0067	0,0067	0,0177	0,0044	0,0107	0,0148	0,0036	0,0093
Acenaphthylen	0,0014	0,0005	0,0090	0,0081	0,0137	0,0047	0,0077	0,0217
Acenaphthen	0,0024	0,0013	0,0073	0,0027	0,0190	0,0080	0,0036	0,0339
Fluoren	0,0014	0,0011	0,0062	0,0009	0,0206	0,0053	0,0029	0,0361
Phenanthren	0,0150	0,0111	0,3091	0,1252	0,2778	0,1171	0,0550	0,4117
Anthracen	0,0027	0,0022	0,0252	0,0168	0,0501	0,0076	0,0103	0,0848
Fluoranthen	0,0289	0,0222	0,4527	0,1724	0,6834	0,0908	0,2357	0,6671
Pyren	0,0210	0,0167	0,3147	0,1398	0,4858	0,0710	0,1725	0,4831
Benz[a]anthracen	0,0117	0,0092	0,1644	0,0688	0,1716	0,0291	0,0493	0,2267
Chrysen	0,0150	0,0114	0,1962	0,0810	0,2342	0,0408	0,0648	0,2841
Benzo[b]fluoranthen	0,0100	0,0074	0,1028	0,0556	0,1045	0,0160	0,0345	0,1538
Benzo[k]fluoranthen	0,0036	0,0024	0,0456	0,0240	0,0441	0,0071	0,0130	0,0690
Benzo(a)pyren	0,0077	0,0051	0,1195	0,0576	0,1102	0,0210	0,0319	0,1661
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,0092	0,0063	0,1400	0,0589	0,1026	0,0243	0,0294	0,1429
Dibenz[a,h]anthracen	0,0021	0,0016	0,0272	0,0671	0,0233	0,0052	0,0074	0,0347
Benzo[ghi]perylen	0,0117	0,0083	0,1189	0,0113	0,0834	0,0230	0,0248	0,1156

Die Obergrenze für die Summe der 16 EPA-PAK im Feststoff nach den Vorgaben der ErsatzbaustoffV beträgt 3 mg/kg für BM-0 und wird damit für die Proben 1.1, 1.3 und 2.2 nicht eingehalten.

Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen für PAK und Kationen im Vergleich zu Grenzwerten (s. auch 2.2) bewertet. Parameter mit Werten in Gelb werden als überwachungsbedürftig eingeschätzt. Werte in Rot stellen eher ein Ausschlusskriterium dar. Tabelle 8 stellt die ermittelten bodenkundlichen Parameter dar.

Tabelle 6: PAK-Gehalte der untersuchten Proben im Feststoff im Vergleich mit Grenzwerten, alle Werte in mg/kg TS

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	1.1a	1.4a
Summe 16 PAK	3,79	1,10	6,86	0,3948	3,40	0,0180	0,0722	1,9898	0,2539
Naphthalin	0,0215	0,0283	0,0551	0,0025	0,0260	0,0002	0,0024	0,0199	0,0050
Acenaphthylen	0,0127	0,0035	0,0341	0,0089	0,0436	0,0005	0,0009	0,0082	0,0013
Acenaphthen	0,0360	0,0289	0,0606	0,0016	0,0210	0,0013	0,0007	0,0243	0,0031
Fluoren	0,0252	0,0123	0,0987	0,0025	0,0221	0,0008	0,0005	0,0126	0,0018
Phenanthren	0,5271	0,1138	1,0677	0,0284	0,2377	0,0048	0,0069	0,3112	0,0232
Anthracen	0,1181	0,0271	0,2350	0,0078	0,0832	0,0004	0,0036	0,0735	0,0050
Fluoranthen	0,7769	0,1854	1,3937	0,0775	0,7440	0,0021	0,0147	0,4246	0,0538
Pyren	0,6331	0,1411	0,9836	0,0642	0,6128	0,0017	0,0120	0,3524	0,0391
Benz[a]anthracen	0,3552	0,1053	0,6318	0,0335	0,2750	0,0010	0,0049	0,1745	0,0238
Chrysen	0,3634	0,1142	0,6396	0,0420	0,4071	0,0014	0,0071	0,1924	0,0261
Benzo[b]fluoranthen	0,1542	0,0660	0,3772	0,0272	0,1997	0,0011	0,0051	0,0813	0,0174
Benzo[k]fluoranthen	0,0832	0,0316	0,1429	0,0121	0,0950	0,0004	0,0023	0,0326	0,0063
Benzo(a)pyren	0,2099	0,0846	0,4056	0,0280	0,2044	0,0006	0,0032	0,1015	0,0142
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,2184	0,0780	0,3439	0,0275	0,1998	0,0009	0,0038	0,0872	0,0152
Dibenz[a,h]anthracen	0,0578	0,0189	0,1064	0,0069	0,0546	0,0002	0,0009	0,0198	0,0040
Benzo[ghi]perylen	0,1937	0,0636	0,2822	0,0241	0,1770	0,0007	0,0033	0,0738	0,0145

	1.4b	1.4c	1.6	1.7	1.5	2.5	M2	M8
Summe 16 PAK	0,1506	0,1136	2,0565	0,8947	2,4351	0,4858	0,562	0,931
Naphthalin	0,0067	0,0067	0,0177	0,0044	0,0107	0,0148	0,0036	0,0093
Acenaphthylen	0,0014	0,0005	0,0090	0,0081	0,0137	0,0047	0,0077	0,0217
Acenaphthen	0,0024	0,0013	0,0073	0,0027	0,0190	0,0080	0,0036	0,0339
Fluoren	0,0014	0,0011	0,0062	0,0009	0,0206	0,0053	0,0029	0,0361
Phenanthren	0,0150	0,0111	0,3091	0,1252	0,2778	0,1171	0,0550	0,4117
Anthracen	0,0027	0,0022	0,0252	0,0168	0,0501	0,0076	0,0103	0,0848
Fluoranthen	0,0289	0,0222	0,4527	0,1724	0,6834	0,0908	0,2357	0,6671
Pyren	0,0210	0,0167	0,3147	0,1398	0,4858	0,0710	0,1725	0,4831

Benz[a]anthracen	0,0117	0,0092	0,1644	0,0688	0,1716	0,0291	0,0493	0,2267
Chrysen	0,0150	0,0114	0,1962	0,0810	0,2342	0,0408	0,0648	0,2841
Benzo[b]fluoranthen	0,0100	0,0074	0,1028	0,0556	0,1045	0,0160	0,0345	0,1538
Benzo[k]fluoranthen	0,0036	0,0024	0,0456	0,0240	0,0441	0,0071	0,0130	0,0690
Benzo(a)pyren	0,0077	0,0051	0,1195	0,0576	0,1102	0,0210	0,0319	0,1661
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,0092	0,0063	0,1400	0,0589	0,1026	0,0243	0,0294	0,1429
Dibenz[a,h]anthracen	0,0021	0,0016	0,0272	0,0671	0,0233	0,0052	0,0074	0,0347
Benzo[ghi]perylen	0,0117	0,0083	0,1189	0,0113	0,0834	0,0230	0,0248	0,1156

Die Obergrenze für die Summe der 16 EPA-PAK im Feststoff nach den Vorgaben der ErsatzbaustoffV beträgt 3 mg/kg für BM-0 und wird damit für die Proben 1.1, 1.3 und 2.2 nicht eingehalten.

Tabelle 7: Elementgehalte der untersuchten Proben im Feststoff im Vergleich mit Grenzwerten, alle Werte in mg/kg TS

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	1.1a	1.4a	*1
As	13,24	22,21	19,73	29,26	32,66	35,19	13,26	6,42	22,22	20
Cd	0,17	0,36	0,19	0,20	0,32	0,09	0,15	0,21	0,16	1
Cr	29,24	19,78	32,78	50,49	61,08	66,99	45,19	22,69	56,95	60
Cu	19,59	16,06	16,52	20,78	25,55	19,18	22,43	20,42	24,30	40
Ni	287,36	177,17	22,06	34,60	137,12	45,13	39,12	36,44	60,31	50
Pb	8,32	10,93	24,67	12,86	20,87	12,37	10,33	8,60	7,70	70
Zn	52,49	53,84	90,26	70,29	101,14	73,15	58,81	51,85	94,81	150
Hg	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,3
Tl	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	1

	1.4b	1.4c	1.6	1.7	1.5	2.5	M2	M8	*1
As	24,52	24,35	5,40	6,52	6,25	6,16	4,70	10,34	20
Cd	0,14	0,15	0,63	0,69	0,37	0,15	0,09	0,15	1
Cr	48,31	51,20	17,56	25,71	30,37	37,69	23,53	40,53	60
Cu	25,00	24,61	39,69	22,13	21,26	28,40	10,74	21,45	40
Ni	58,24	53,77	10,20	11,90	18,33	17,69	15,84	23,36	50
Pb	10,10	8,50	231,95	10,92	7,85	33,16	5,33	10,14	70
Zn	82,19	87,14	107,05	55,64	43,85	90,54	50,51	81,33	150
Hg	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	<BG	<BG	0,3
Tl	< BG	< BG	n.n	n.n	< BG	< BG	<BG	<BG	1

Auffällig ist, dass einige der Proben der Firma feess (1.1, 1.2 und 2.2) eine grenwertüberschreitende Nickelbelastung aufweisen. Zusätzlich weisen fast alle Proben der Firma eine starke Arsen Konzentration auf, was auf eine geogene Belastung des Bodenmaterials hinweisen könnte.

Tabelle 8: Bodenkundliche Parameter

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	1.1a	1.4a
Eingangsfeuchte [%] DIN ISO 12880	8,53	5,53	10,14	28,29	33,56	12,88	4,23	4,74	3,02
Restfeuchte [%] DIN ISO 12880	2,81	1,01	2,03	---	---	---	---	---	---
pH-Wert (H_2O) DIN ISO 10390	12,39	10,38	11,41	8,57	8,79	7,96	8,63	12,23	8,78
Korndichte DIN 66137-2	2,56	2,71	2,63	2,66	2,67	2,66	2,47	2,42	2,66
Carbonatgehalt DIN ISO 10693	14,51	14,55	15,16	19,64	19,48	1,36	1,36	19,63	13,10
Glühverlust DIN ISO 18128	3,08	1,33	2,44	4,35	4,49	3,46	3,46	3,75	2,98
Corg (geschätzt aus Glühverlust, Faktor 0,58)	1,79	0,77	1,41	2,52	2,60	2,01	2,01	2,17	1,73

	1.4b	1.4c	1.6	1.7	1.5	2.5	M2	M8	*2
Eingangsfeuchte [%] DIN ISO 12880	1,85	2,62	---	1,21	4,33	1,43	5,78	8,96	
Restfeuchte [%] DIN ISO 12880	---	---	0,65	---	---	---	---	---	
pH-Wert (H_2O) DIN ISO 10390	9,01	8,86	9,55	12,49	11,07	8,77	9,39	11,46	
Korndichte DIN 66137-2	2,68	2,68	2,64	2,51	2,371	2,63	2,67	2,63	
Carbonatgehalt DIN ISO 10693	18,69	20,48	4,08	6,02	26,39	4,57	12,04	19,31	
Glühverlust DIN ISO 18128	2,74	3,38	1,02	2,295	2,54	2,49	0,949	2,366	
Corg (geschätzt aus Glühverlust, Faktor 0,58)	1,59	1,96	0,59	1,33	1,47	1,44	0,55	1,37	TOC 1 %

*1 Vorsorgewert Bodenart Lehm/Schluff, BBodSchV und Materialwert BM-0 nach EBV

2 Grenzwert EBV BM-0

*Tabelle 9b: Bodenkundliche Parameter (DIN EN 13139 Gesteinskörnungen für Mörtel, ergänzt um 0,500 und 0,125 mm, ** gefriergetrocknet)

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3 *	2.4	1.1a	1.4a	1.4b	1.4c
> 4 mm	0,31	0,46	0,11	-	-	0,00	28,47	0,00	0,00	1,33	0,57
2 - 4 mm	13,19	28,67	13,13	-	-	0,55	23,49	19,10	0,00	51,33	33,15
1 - 2 mm	25,30	39,61	25,80	-	-	2,28	22,64	34,91	0,00	27,81	24,77
0,5 - 1 mm	22,18	15,90	20,40	-	-	8,83	13,74	26,91	0,00	11,99	16,01
0,25 - 0,5 mm	19,22	8,37	15,62	-	-	11,57	5,27	18,06	9,58	5,23	10,41
0,125 - 0,25 mm	10,51	4,49	8,92	-	-	10,37	1,89	0,19	42,72	0,64	7,00
0,063 - 0,125 mm	5,50	2,08	6,51	-	-	9,94	3,33	0,13	23,35	0,79	5,00
< 0,063 mm	3,63	0,63	9,19	-	-	56,15	1,00	0,10	23,64	0,54	2,74
Anteil < 2mm	86,34	71,08	86,45			99,14	47,88	80,29	99,29	47,00	65,93

	1.6	1.7	1.5	2.5	M2 *	M8 *
> 4 mm	0,00	0,00	0,11	9,30	0,00	0,00
2 - 4 mm	0,10	5,54	13,43	11,38	3,13	7,96
1 - 2 mm	0,75	20,49	27,95	9,11	9,85	16,04
0,5 - 1 mm	5,76	25,60	24,07	5,63	26,22	25,26
0,25 - 0,5 mm	30,83	23,81	18,94	4,72	28,08	20,05
0,125 - 0,25 mm	36,13	12,88	11,94	5,95	6,18	10,07
0,063 - 0,125 mm	20,16	5,73	3,14	19,66	7,09	9,23
< 0,063 mm	6,10	5,73	0,02	33,82	18,99	10,84
Anteil < 2mm	99,73	94,24	86,06	78,90	96,42	91,50

Die Korngrößenverteilungen der beiden Mischungen M2 und M8 (und des Filderlehms, Probe 2.3) konnten auf Grund von Aggregatbildungen mit einer Siebung allein nicht ermittelt werden. Die Proben wurden daher gefriergetrocknet, was die schonende Auflösung von Aggregaten ohne Zerkleinerung von Körnern ermöglichte. Es wurde eine Trockensiebung bis 0,63 µm durchgeführt, dann wurden die Fraktionen wieder vereint und zwei repräsentative Anteile von 50 g (Doppelmessung) suspendiert. Die organische Substanz wurde mit H_2O_2 entfernt und die Suspension unter Zugabe von $Na_2P_4O_7 \cdot 10\ H_2O$ über Nacht geschüttelt. Die Messung der Feinkornanteile in der Suspension erfolgte mittels des Partikelmessgerätes PARIO (Meter GmbH). Die Software des Messgerätes kombiniert die Daten der Siebung und der gemessenen Feinkornanteile. Nach der Korngrößenverteilung sind die Mischungen M2 und M8 als mittel schluffiger Sand (Su3) nach der bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 einzustufen (Abbildung 18 und Abbildung 19) Der Filderlehm (Probe 2.3) ist nach der Korngrößenverteilung als reiner Schluff (Uu) bis sandiger Schluff (Us) einzustufen (Abbildung 17).

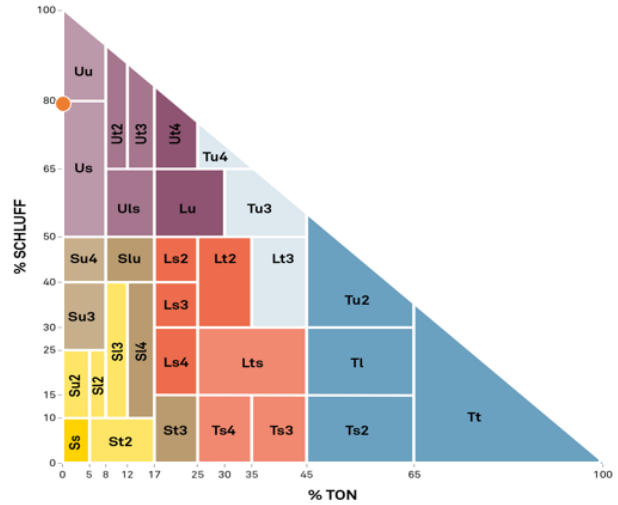


Abbildung 17: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für Probe 2.3

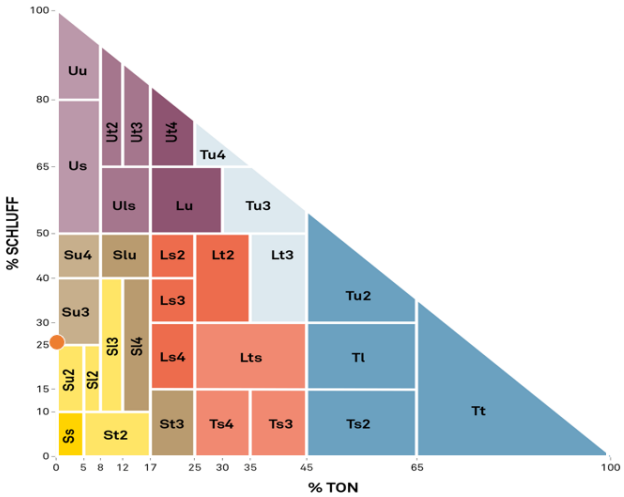


Abbildung 18: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für die Mischung M2

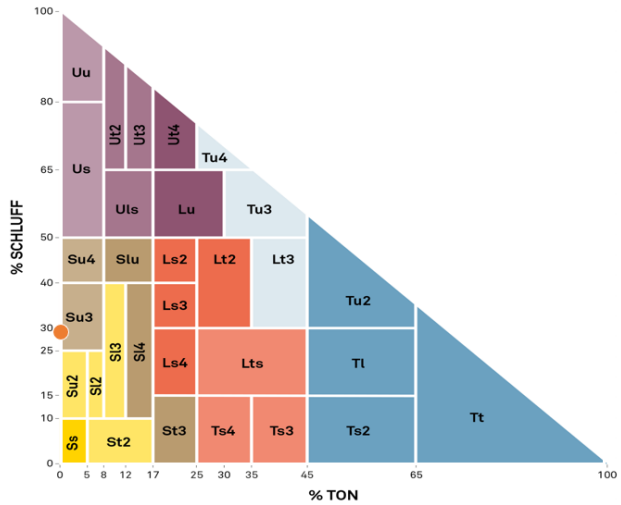


Abbildung 19: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für die Mischung M8

Salzgehalte

Die Gehalte an bauschädlichen Salzen werden für alle Lehmbaustoffe in gleicher Höhe begrenzt. Die Anionenkonzentration der wichtigsten bauschädlichen Salze darf die nachfolgenden Werte nicht überschreiten:

- Nitrat: 0,02 Masse-%
- Sulfate: 0,10 Masse-%
- Chloride: 0,08 Masse-%.

Die Summe der bauschädlichen Salze darf nicht über 0,12 Masse-% liegen. Oberhalb dieser Werte wäre mit weißlichen Belegen und delaminierten Oberflächen zu rechnen.

Für Ausgangsstoffe existieren keine Grenzwerte an bauschädlichen Salzen, weil die Salzkonzentration durch weitere Ausgangsstoffe „verdünnt" oder „aufkonzentriert" werden kann. Der mögliche Gehalt an bauschädlichen Salzen einzelner Ausgangsstoffe wird also auch und im Wesentlichen von der Rezeptur bestimmt. Ggf. ergeben sich durch zu hohe Salzgehalte der Rezyklate geringere Beimischungsquoten. Aus den Erfahrungswerten in der Materialentwicklung von Lehmbaustoffen werden von ZRS Ingenieuren Salzgehalte der Ausgangsstoffe (also der Einzelkomponenten) als „mittel-belastet" (gelb) gekennzeichnet, wenn die Belastung den o.g. Grenzwerten entspricht und als „hoch-belastet" (rot) belastet, wenn die Salzgehalte über den o.g. Grenzwerten liegen.

Die Salzgehalte wurden mittels photometrischem Verfahren bestimmt; dem in der Bauschadensanalyse üblichen Verfahren hoher Genauigkeit. Einfachere Verfahren, wie Testung mittels Teststäbchen, zeigen die Ergebnisse nicht in der erforderlichen Genauigkeit an und sind nicht ausreichend sensitiv. Mittels photometrischem Verfahren wurden an den Proben folgende Gehalte an bauschädlichen Salzen bestimmt und entsprechend den o.g, Maßstäben gekennzeichnet (Tabelle 10):

Tabelle 10: Ergebnisse Salzanalyse

lfd. Nr.	Entnahmematerial		Nitrate			Sulfate			Chloride			∑ Anionengehalt
			mg/l		Masse-%		mg/l	Masse-%		mg/l	Masse-%	Masse-%
2.1	NKA-Schluff aus Boden		5		0,02	<	20	0,08		4	0,02	0,12
2.2	NKA-Schluff aus Boden-/B.	<	4		0,02		63	0,25		3	0,01	0,28
2.3	Filderlehm/natur	<	4		0,02	<	20	0,08		2	0,01	0,10
1.2	NKA-Sand 0/2	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10
1.3	Baustoffsand 0/2		5		0,02		169	0,67		7	0,03	0,72
1.1	Betonsand 0/2	<	4		0,02		75	0,30		5	0,02	0,33
1.4	Bodenaushub	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10
2.4	Steinfreier Boden ohne Kalk	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10

Damit zeigt sich an der Probe 2.1 eine mittlere und an Probe 2.2, 1.3 und 1.1 eine hohe Belastung. Diese Stoffe könnten also aus Gründen der Belastung mit bauschädlichen Salzen nur in reduzierten Anteilen beigemischt werden, damit sich eine ausreichende Verdünnung mittels geringer belasteter Ausgangsstoffe einstellt. Kritisch ist vor allem die Sulfatbelastung, was auf Gipsbaustoffanteile im Recycling schließen lässt, die nicht durch eine Sortierung entfernt wurden.

Foto: ZRS Ingenieure

Abbildung 20: Proben zur Analyse der bauschädlichen Salze

UAP 2.2 – Schadstoffuntersuchungen am Rezyklat im Eluat und Abgleich mit Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung

Eluatanalysen wurden, basierend auf Schüttelversuchen, nach DIN 19529 beim W/F 2 l/kg durchgeführt. Für die hergestellten Lehmbausteine waren wegen der erwarteten Instabilität Trogversuche nicht sinnvoll. Da die Eluatwerte eines Trogversuches in der Regel auch auf die Oberfläche des monolithischen Bauproduktes bezogen werden, wären die Werte auch nicht mit den anderen Analysenergebnissen direkt vergleichbar. Alternativ wurden daher von den Mischungen M2 und M8 auch Säulenversuche nach DIN 19528 durchgeführt (Doppelversuche) (Abbildung 21).

Säulenversuche sind für Proben zu empfehlen, die sich als besonders geeignet für die Verwendung in Lehmbaustoffen erweisen, um den zeitlichen Verlauf der Stofffreisetzung zu untersuchen (eventuell Nachweis eines schnellen Abklingverhaltens).

Die Ergebnisse der Eluatanalysen wurden besonders mit den Einbauwerten der Ersatzbaustoffverordnung (EBV), aber auch der BBodSchV und den Anforderungen des DIBt (MV V TB) verglichen. Dies stellt im Vergleich zu den Verwendungsbedingungen (i.d.R. kein Kontakt mit Niederschlagswasser) ein Worst-Case-Szenario dar. Diese scharfen Kriterien werden hier im Sinne des nachhaltigen und verantwortungsbewussten Bauens angelegt. Leichte Grenzwertüberschreitungen sollten daher nicht überbewertet werden, auch weil die RC-Materialien in Lehmbaustoffen nur einen Teil der Rohstoffe ersetzen werden. Größere Grenzwertüberschreitungen werden auch mit Blick auf einen späteren Rückbau der entsprechenden Lehmbaustoffe als Ausschlusskriterium behandelt.

Es sind weitergehende Säulenversuchen (ggf. auch Trogversuche an Lehmbausteinen) für die Proben vorgesehen, die sich als besonders geeignet für die Verwendung in Lehmbaustoffen erweisen, um den zeitlichen Verlauf der Stofffreisetzung zu untersuchen (eventuell Nachweis eines schnellen Abklingverhaltens).

Abbildung 21: Säulenversuche nach DIN 19528 in einer automatischen Säulenversuchsanlage (ecoTech GmbH, Bonn)

Ergebnisse

Bei einigen Proben werden PAK-Werte überschritten (Werte in Rot), aber für die Mischungen werden die Grenzwerte eingehalten. Die Werte für Säulen- und Schütteleluate stimmen dabei im Rahmen der üblicherweise hohen Messunsicherheiten für PAK gut überein. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen im Vergleich zu Grenzwerten (s. 2.2) für PAK dargestellt. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen im Vergleich zu Grenzwerten für Kationen dargestellt. Bei einigen

Proben werden PAK-Werte überschritten (Werte in Rot), aber für die Mischungen werden die Grenzwerte eingehalten. Die Werte für Säulen- und Schütteleluate stimmen dabei im Rahmen der üblicherweise hohen Messunsicherheiten für PAK gut überein.

Tabelle 11: PAK-Konzentrationen im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten

		1.1 Sch2	1.2 Sch2	1.3 Sch2	2.1 Sch2	2.2 Sch2	2.3 Sch2	Eluat-wert EBV RC-1	Eluat-wert EBV BM-0*
Summe 16 PAK DIN EN 38407-39 (GC-MS)	µg/l	6,45	0,25	12,43	0,04	0,05	0,06		
Summe 15 PAK (ohne Naphthalin) **DIN 38407-39 (GC-MS)**	µg/l	4,61	0,25	11,70	0,04	0,05	0,06	4,0	0,2
Naphthalin	µg/l	1,8460	0,0731	0,7291	0,0081	0,0046	0,0076		
Acenaphthylen	µg/l	0,0357	0,0044	0,1650	0,0009	0,0008	0,0018		
Acenaphthen	µg/l	0,8148	0,0255	1,9037	0,0021	0,0017	0,0174		
Fluoren	µg/l	0,3963	0,0180	0,8388	0,0015	0,0010	0,0072		
Phenanthren	µg/l	2,0363	0,0557	4,6450	0,0099	0,0061	0,0114		
Anthracen	µg/l	0,3006	0,0106	0,7981	0,0042	0,0081	0,0011		
Fluoranthen	µg/l	0,5899	0,0351	2,0087	0,0076	0,0127	0,0042		
Pyren	µg/l	0,3742	0,0263	1,1091	0,0070	0,0126	0,0038		
Benz[a]anthracen	µg/l	0,0237	0,0017	0,0976	0,0006	0,0007	0,0003		
Chrysen	µg/l	0,0307	0,0022	0,1106	0,0009	0,0014	0,0005		
Benzo[b]fluoranthen	µg/l	0,0024	0,0006	0,0094	0,0004	0,0006	< BG		
Benzo[k]fluoranthen	µg/l	0,0009	< BG	0,0043	< BG	0,0002	< BG		
Benzo(a)pyren	µg/l	0,0015	0,0004	0,0060	< BG	0,0003	< BG		
Indeno[1,2,3-cd]pyren	µg/l	< BG	< BG	0,0016	< BG	< BG	< BG		
Dibenz[a,h]anthracen	µg/l	< BG	< BG	0,0003	< BG	< BG	< BG		
Benzo[ghi]perylen	µg/l	< BG	< BG	0,0019	< BG	< BG	< BG		

		2.4 Sch2	1.1a Sch2	1.4a Sch2	1.4b Sch2	1.4c Sch2	1.6 Sch2	Eluat wert EBV RC-1	Eluat wert EBV BM-0*
Summe 16 PAK DIN EN 38407-39 (GC-MS)	µg/l	---	4,42	---	0,25	0,24	7,291		
Summe 15 PAK (ohne Naphthalin) **DIN 38407-39 (GC-MS)**	µg/l	---	3,93	---	0,17	0,15	7,0576	4,0	0,2
Naphthalin	µg/l	---	0,4858	---	0,0847	0,0859	0,2334		
Acenaphthylen	µg/l	---	0,0254	---	0,0021	0,0021	0,0435		
Acenaphthen	µg/l	---	0,4576	---	0,0140	0,0064	0,2665		
Fluoren	µg/l	---	0,1640	---	0,0060	0,0042	0,1955		
Phenanthren	µg/l	---	1,9535	---	0,0715	0,0769	4,0182		
Anthracen	µg/l	---	0,2623	---	0,0142	0,0134	0,2429		
Fluoranthen	µg/l	---	0,6104	---	0,0335	0,0285	1,4086		
Pyren	µg/l	---	0,3949	---	0,0232	0,0185	0,7134		
Benz[a]anthracen	µg/l	---	0,0260	---	0,0018	0,0012	0,0632		
Chrysen	µg/l	---	0,0361	---	0,0027	0,0020	0,0873		
Benzo[b]fluoranthen	µg/l	---	0,0023	---	< BG	< BG	0,0081		
Benzo[k]fluoranthen	µg/l	---	0,0005	---	< BG	< BG	0,0038		
Benzo(a)pyren	µg/l	---	0,0012	---	< BG	< BG	0,0031		
Indeno[1,2,3-cd]pyren	µg/l	---	< BG	---	< BG	< BG	0,0012		
Dibenz[a,h]anthracen	µg/l	---	< BG	---	< BG	< BG	0,0007		
Benzo[ghi]perylen	µg/l	---	< BG	---	< BG	< BG	0,0012		

		1.7 Sch2	1.5 Sch2	2.5 Sch2	M2 Sch2	M8 Sch2	M2 SV2	M2 SV2	Eluatwert EBV RC-1	Eluatwert EBV BM-0*
Summe 16 PAK DIN EN 38407-39 (GC-MS)	µg/l	11,35	2,54	1,191	0,525	2,522	0,247	1,979		
Summe 15 PAK (ohne Naphthalin) **DIN 38407-39 (GC-MS)**	µg/l	9,84	2,36	0,622	0,508	2,326	0,153	1,653	4,0	0,2
Naphthalin	µg/l	1,5140	0,1844	0,5695	0,0176	0,1954	0,094	0,234		
Acenaphthylen	µg/l	0,2512	0,0204	0,0187	0,0079	0,0463	0,013	0,046		
Acenaphthen	µg/l	0,4409	0,2546	0,1014	0,0295	0,2979	0,009	0,308		
Fluoren	µg/l	0,0342	0,2059	0,0642	0,0097	0,1837	0,001	0,126		
Phenanthren	µg/l	5,5760	0,8943	0,3397	0,0594	0,9030	0,007	0,505		
Anthracen	µg/l	0,5193	0,1159	0,0178	0,0153	0,1280	0,010	0,099		
Fluoranthen	µg/l	1,6958	0,5159	0,0400	0,1899	0,4375	0,039	0,386		
Pyren	µg/l	1,1193	0,3023	0,0293	0,1603	0,2750	0,054	0,242		
Benz[a]anthracen	µg/l	0,0812	0,0167	0,0033	0,0081	0,0196	0,002	0,013		0,3
Chrysen	µg/l	0,1035	0,0264	0,0065	0,0123	0,0258	0,007	0,019		
Benzo[b]fluoranthen	µg/l	0,0091	0,0030	0,0007	0,0021	0,0027	0,004	0,001		
Benzo[k]fluoranthen	µg/l	0,0041	0,0013	< BG	0,0009	0,0010	0,002	< BG		
Benzo(a)pyren	µg/l	0,0035	0,0016	< BG	0,0011	0,0017	0,002	< BG		
Indeno[1,2,3-cd]pyren	µg/l	< BG	< BG	< BG	0,0034	0,0014	0,002	< BG		
Dibenz[a,h]anthracen	µg/l	< BG	< BG	< BG	0,0038	0,0012	< BG	< BG		
Benzo[ghi]perylen	µg/l	< BG	< BG	< BG	0,0039	0,0014	0,003	< BG		

Tabelle 12: Kationen-Konzentration im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten

ICP-OES		1.1 Sch2	1.2 Sch2	1.3 Sch2	2.1 Sch2	2.2 Sch2	2.3 Sch2	1.1a Sch2	1.4b Sch2	1.4c Sch2	Eluatwert EBV RC-1	Eluatwert EBV BM-0*
As	µg/l	5,33	2,23	9,11	< BG	3,02	< BG	< BG	2,89	< BG		8 (13)
Cd	µg/l	0,84	< BG	0,94	< BG	0,41	< BG	< BG	< BG	< BG		2 (4)
Cr	µg/l	17,36	4,27	122,8	4,89	1,64	1,33	14,80	0,91	1,18	150	10 (19)
Cu	µg/l	84,72	12,86	37,54	11,16	13,63	6,47	70,56	< BG	< BG	110	20 (41)
Hg	µg/l	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		0,1
Ni	µg/l	52,18	< BG	20,35	7,01	8,91	< BG	17,17	2,45	< BG		20 (31)
Pb	µg/l	5,50	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	22,8	< BG	< BG		23 (43)
V	µg/l	< BG	< BG	28,68	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	120	
Zn	µg/l	44,61	< BG	7,25	55,12	61,76	50,14	41,73	< BG	21,61		100 (210)
S	mg/l	3,53	55,39	166,59	56,24	217,84	4,01	3,976	6,23	8,53		
Tl	µg/l	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		0,2 (0,3)

ICP-OES		1.7 Sch2	1.5 Sch2	2.5 Sch2	M2 Sch2	M8 Sch2	M2 SV2	M8 SV2	Eluatwert EBV RC-1	Eluatwert EBV BM-0*
As	µg/l	< BG	< BG	7,27	<BG	<BG	<BG	<BG		8 (13)
Cd	µg/l	< BG	< BG	< BG	<BG	<BG	<BG	<BG		2 (4)
Cr	µg/l	13,28	74,18	1,61	1,13	54,32	2,50	58,04	150	10 (19)
Cu	µg/l	53,71	26,6	123,54	<BG	27,64	4,25	41,25	110	20 (41)
Hg	µg/l	< BG	< BG	< BG	<BG	<BG	<BG	<BG		0,1
Ni	µg/l	< BG	3,54	7,63	<BG	<BG	<BG	<BG		20 (31)

Pb	µg/l	6,67	11,31	< BG	<BG	<BG	<BG	<BG		23 (43)
V	µg/l	< BG	5,11	29,53	6,158	<BG	<BG	<BG	120	
Zn	µg/l	80,48	5,11	29,53	10,48	22,95	6,43	<BG		100 (210)
S	mg/l	4,93	20,12	354,69	18,93	15,25	16,54	9,58		
Tl	µg/l	< BG	< BG	< BG	<BG	<BG	<BG	<BG		0,2 (0,3)

Die Eluatwerte nach EBV für die Qualität RC-1 werden eingehalten. Die Qualität BM-0* wird durch teilweise Cr und Cu Überschreitungen nicht erreicht.

Obergrenzen für Kationen im Eluat nach den Vorgaben des DIBt (MV V TB, Tabelle A-2, Anhang A) sind: As 50 µg/l, Cd 5 µg/l, Cr 100 µg/l, Cu 200 µg/l, Hg 2 µg/l, Ni 100 µg/l, Pb 100 µg/l, Zn 400 µg/l.

Diese beziehen sich aktuell jedoch auf ein W/F von 10 l/kg. Lediglich der Baustoffsand 0/2 mm würde die Obergrenze für Cr überschreiten. Im W/F 10-Eluat der untersuchten Proben wären aber niedrigere Eluatkonzentrationen zu erwarten, so dass vermutlich auch der Cr-Wert eingehalten werden würde. Eine Umrechnung mit dem Faktor des W/F-Verhältnisses ist nicht gestattet, da eine solche lineare Beziehung tatsächlich meist nicht vorliegt.

Die Werte für Säulen- und Schütteleluate stimmen im Rahmen der üblichen Messunsicherheiten gut überein.

Tabelle 13 stellt die Anionenkonzentrationen im Schütteleluat nach DIN 19529 dar.

Tabelle 13: Anionen-Konzentration im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten

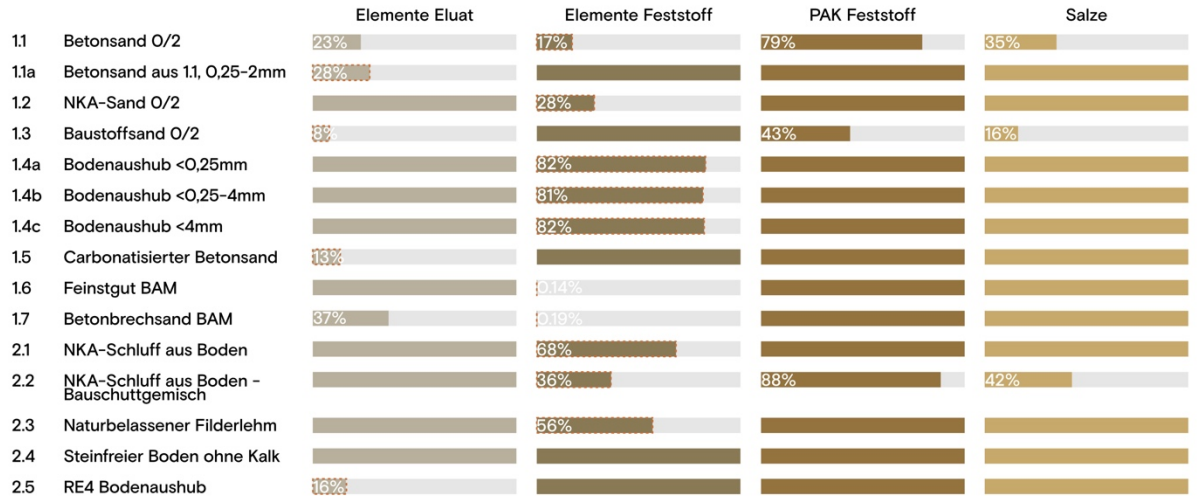
		1.1 Sch2	**1.2 Sch2**	**1.3 Sch2**	**2.1 Sch2**	**2.2 Sch2**	**2.3 Sch2**	**1.6 Sch2**	**1.7 Sch2**	**1.5 Sch2**	**2.5 Sch2**	EBV RC-1	EBV BM-0*
Chlorid	mg/l	29,30	6,53	87,59	39,52	22,95	9,81	20,66	59,68	25,03	20,66		
Sulfat	mg/l	4,91	138,0	492,2	149,4	618,5	8,66	10,40	51,06	941,9	10,40	600	250
Nitrat	mg/l	< 0,27	7,48	12,33	64,48	52,50	0,49	<BG	<BG	7,24	28,14		

		M2 Sch2	**M8 Sch2**	**M2 SV2**	**M8 SV2**	EBV RC-1	EBV BM-0*
Chlorid	mg/l	3,47	32,57	2,53	28,64		
Sulfat	mg/l	55,13	42,90	51,93	30,55	600	250
Nitrat	mg/l	<BG	<BG	<BG	6,26		

Die Eluatwerte für die Anionen Chlorid, Sulfat und Nitrat sind als unkritisch einzustufen. Die Werte für Säulen- und Schütteleluate stimmen gut überein. Die DIBt-Regularien sehen im Eluat bei W/F 10 l/kg Grenzwerte für Chlorid (150 mg/l) und Sulfat (600 mg/l) vor. Geht man bei einer weiteren Verdünnung bei einem höheren W/F 10 aus, können auch diese Grenzwerte als sicher eingehalten betrachtet werden.

Zusammenfassung

Aus den unterschiedlichen Untersuchungen gehen maximale Substitutionsanteile hervor. Diese sind in Tabelle 23 dargestellt und in % angegeben. Für das weitere Vorgehen ist es wichtig zu erwähnen, dass der § 9a des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) nicht zur Anwendung kommt, da es sich um Stoffe handelt, die einen Aufbereitungsprozess hinter sich haben und demnach nicht mehr als Abfall einzustufen sind. Da bei den Untersuchungen der Luftschadstoffe (werden im Folgenden beschrieben) keine Einschränkungen aufgetreten sind, bezieht sich die unten aufgeführte Matrix nur auf Schadstoffe im Feststoff.



Grafik: NBL

Abbildung 22: Übersicht maximale Substitutionsraten

UAP 2.3 – Screeningtests schwerflüchtiger Stoffe (Thermoextraktion)

Die Rezyklate wurden Screeningtests unterzogen. Neben der Bestimmung von Schadstoffgehalten (UAP 2.1/2.2) soll hier das Potenzial des Schadstoffübertritts vom Material in die Innenraumluft untersucht werden. Dafür wurden von jedem Material ca. 8,5 g in Petrischalen aus Polystyrol eingewogen und jeweils in eine Mikro-Kammer (µ-CTE, Markes™) geladen (Abbildung 23). Jede Kammer hat ein Volumen von 44 mL und wird mit befeuchteter Luft (50 % rel. Feuchte) permanent durchspült. Bei einem durchschnittlichen Durchfluss von 26,4 mL/min ergibt sich in den Kammern eine Luftwechselrate von etwa 36 h^{-1}, die deutlich höher ist als die von der Prüfkammernorm EN 16516 geforderte. Daher wird die µ-CTE hier ausschließlich für die orientierenden Screeningtests verwendet. Ziel ist es, potenzielle Schadstoffe, insbesondere flüchtige und schwerflüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC, SVOC), zu identifizieren.

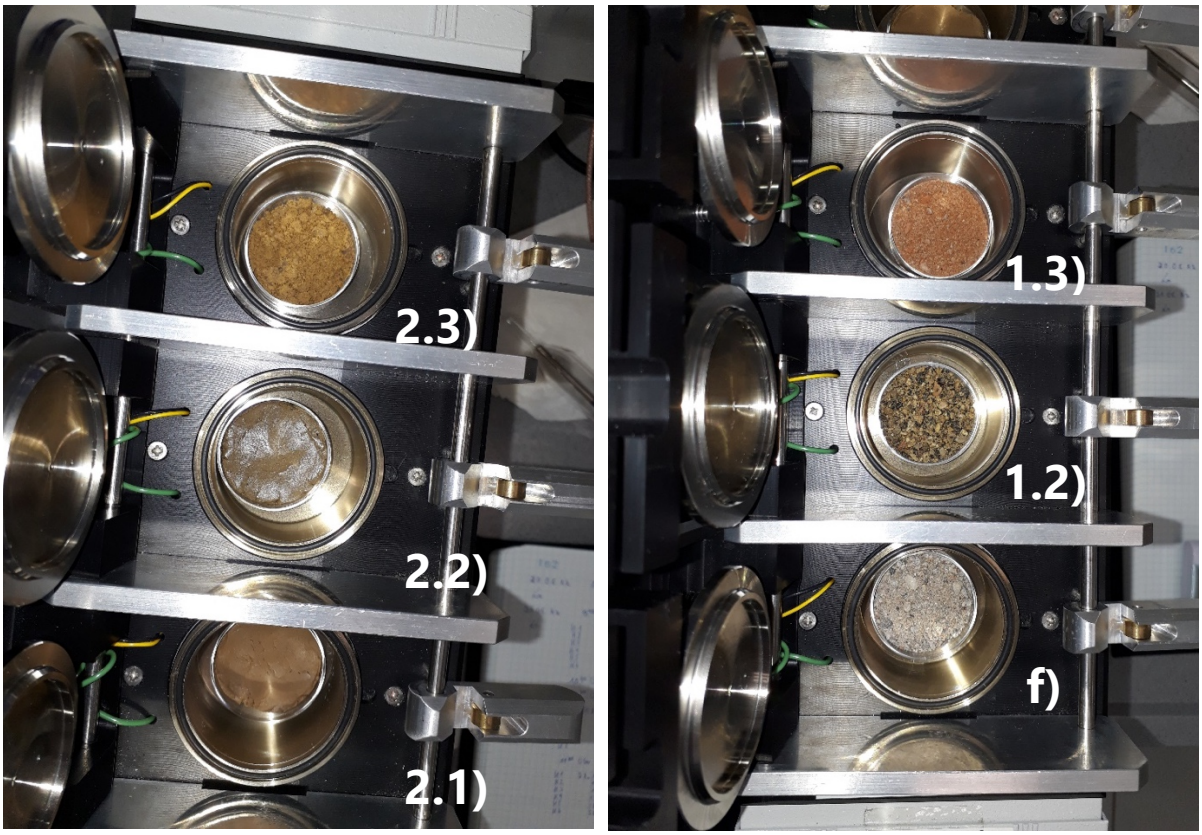


Foto: BAM

Abbildung 23: Beladene µ-CTE mit Materialproben: 2.3) naturbelassener Filderlehm, 2.1) NKA-Schluff aus Boden-Bauschuttgemisch, 2.2) NKA-Schluff aus Boden, 1.3) Baustoffsand 0/2, 1.2) NKA-Sand 0/2, 1.1) Betonsand 0/2

Die Proben verblieben insgesamt neun Tage in der µ-CTE. Es erfolgten Probenahmen auf Tenax® TA vier Stunden, 24 Stunden, 3 Tage und 7 Tage nach Beladung bei einer Kammertemperatur von 23 °C. Am 8. Tag nach Beladung wurde die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht und es erfolgten weitere Probenahmen nach vier und 24 Stunden.

Besonders nach vier und 24 Stunden nach Beladung sowie nach der Erhöhung der Temperatur stieg die rel. Luftfeuchtigkeit aufgrund der Eigenfeuchte der Proben stark an, sodass es zu Kondensation von Wasser im Probenahmerohr kam. Dieses wurde vor der Analyse durch kurzzeitiges Spülen des Rohres mit trockenem Inertgas beseitigt.

Die Analyse erfolgte mittels Thermodesorptions-Gaschromatographie gekoppelt mit einem Massenspektrometer (TD-GC/MS) auf einer DB-5UI MS-Chromatographiesäule (60 m x 0,25 µm x 0,25 mm).

In gleicher Vorgehensweise wurden die Tests aus weiteren Teilproben der gleichen Materialien wiederholt. Der einzige Unterschied bestand darin, dass wegen der erheblichen Freisetzung von Wasser aufgrund der Eigenfeuchte des Materials auf die Probenahme an Tag 0 (vier Stunden) und Tag 1 nach Beladung verzichtet wurde. Die erste Probenahme erfolgte demnach am 2. Tag nach der Beladung, alle weiteren entsprechend dem ersten Schema.

Ergebnisse

In Tabelle 14 bis Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Untersuchungen aufgeführt. Lediglich bei den drei Materialproben Betonsand 0/2, NKA-Sand 0/2 sowie Baustoffsand 0/2 waren Emissionen feststellbar, die aber bereits nach 24 Stunden kaum oder gar nicht mehr nachzuweisen waren. Auffällig war das Auftreten von PAK im Baustoffsand (1,7-Dimethylnaphthalin, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren), was sich jedoch mit den Beobachtungen der Feststoffuntersuchungen deckt. Aber auch diese Emissionen waren bereits nach 24 Stunden sowie nach der Temperaturerhöhung nicht mehr nachweisbar.

Tabelle 14: Ergebnisse der Screeningtests für Betonsand 0/2 (1.1) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden.

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)					
		Temperatur = 23 °C				Temperatur = 60 °C	
	PN-Tag	*0 d*	*1 d*	*3 d*	*7 d*	*8 d*	*9 d*
1-Butanol	71-36-3	117	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Ethylenglykolmono-butylether	111-76-2	15,7	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Benzaldehyd	100-52-7	15,5	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
2-Ethylhexanol	104-76-7	78,6	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Benzylalkohol	100-51-6	6,1	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Tetradecan	629-59-4	8,1	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Pentadecan	629-62-9	5,3	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Heneicosan	629-94-7	---	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	14,1

Tabelle 15: Ergebnisse der Screeningtests für NKA-Sand 0/2 (1.2) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden.

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)					
		Temperatur = 23 °C				Temperatur = 60 °C	
	PN-Tag	*0 d*	*1 d*	*3 d*	*7 d*	*8 d*	*9 d*
n-Decan	124-18-5	< BG	7,3	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*

Tabelle 16: Ergebnisse der Screeningtests für Baustoffsand 0/2 (1.3) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden.

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)					
		Temperatur = 23 °C				Temperatur = 60 °C	
	PN-Tag	*0 d*	*1 d*	*3 d*	*7 d*	*8 d*	*9 d*
unbekannt		8,1	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
1,7-Dimethylnaphthalin	575-37-1	6,0	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Acenaphthen	83-32-9	15,2	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
unbekannt		8,8	5,1	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Fluoren	86-73-7	7,4	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*
Phenanthren	85-01-8	7,5	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*	*< BG*

Bei der Wiederholung der Messungen mit Material aus der zweiten Teilprobe konnten keine Emissionen nachgewiesen werden.

UAP 2.4 – Messungen Luftschadstoffemissionen

Den größten Teil des Tages halten wir uns in geschlossenen Räumen auf. Davon verbringen wir die meiste Zeit in den eigenen vier Wänden. Die Qualität der Innenraumluft in unserer Wohnung hat daher eine große Bedeutung für Gesundheit und Wohlbefinden. Einen hohen Einfluss auf eine gute Luftqualität können dabei großflächige Bauprodukte haben. Daraus können flüchtige organische Verbindungen bei Zimmertemperatur aus diesen ausgasen, sich in der Innenraumluft anreichern und dadurch ihre Qualität beeinträchtigen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Untersuchung der Materialentwicklungen der Lehmputzmörtel M2 und M8 sowie der Lehmsteine S2 und S8 in 270 L-Emissionsprüfkammern beschrieben.

Emissionsprüfkammern

Die Emissionsuntersuchungen an den finalen Materialmischungen wurden in 270 L-Kammern durchgeführt, die auf Deckelfässern aus Edelstahl basieren und zusätzlich elektropoliert sind. Sowohl die Flüsse der Zu- als auch die Abluft werden messtechnisch überwacht. Die Durchmischung der Prüfkammerluft (Geschwindigkeit 0,1-0,3 m/s über dem Prüfstück) erfolgt mit einem in der Kammer befindlichen Ventilator, dessen Welle magnetisch über die Edelstahlwandung mit dem außenliegenden Motor verbunden ist. Dadurch kann auf eine Bohrung zur Durchführung der Welle vom Motor zum Ventilator verzichtet werden und eine emissionsarme Lagerung erreicht werden. Der Deckel des Fasses enthält einige angeschweißte Probenahmestutzen und ist mit einer Dichtung aus Viton™-Schaum ausgestattet. Die Einstellung des Luftwechsels wird mit Hilfe von Proportionalventilen geregelt. Hierbei wird über die Frequenz des Schaltens (auf/zu) der in die Kammer strömende Volumenstrom geregelt. Die Abluft wird durch umgebaute Gasmengenzähler geleitet, um einen möglichst geringen Gegendruck bei der Strömungsmessung zu realisieren. Abbildung 24 zeigt ein Foto der Kammern und Abbildung 25 eine Lehmputzprobe in der Kammer. In Abbildung 26 wird die Probenahme an der Kammer dargestellt.

Foto: BAM

Abbildung 24: 270 l-Emissionsprüfkammer

Foto: BAM

Abbildung 25: Lehmputzprobe in der 270 l-Emissionsprüfkammer

Foto: BAM

Abbildung 26: Probenahme an der 270 l-Emissionsprüfkammer mit einem Tenax®-Rohr

VOC-Probenahme

Die VOC-Probenahme aus der Emissionsprüfkammerluft erfolgt gemäß DIN EN 16516 [33] bzw. DIN ISO 16000-6. Die Luftprobe wird auf ein mit dem Adsorbens Tenax® TA gefülltes Glasrohr gezogen. Vor der Probenahme werden die Tenax® TA-Rohre mit Naphthalin-d8 (CAS: 1146-65-2) und Hexadecan-d34 (CAS: 15716-08-2) in 1 µL Methanol als internem Standard beaufschlagt. Das Probenahmevolumen der Prüfkammerluft liegt zwischen 0,5 L bis 3 L. Der Probenahmevolumenstrom beträgt 100 mL/min.

Mit der Tenax® TA-Methode lassen sich die meisten VOC sammeln und mit dem oben beschriebenen Verfahren detektieren. Beginnend mit den kleinsten Kalibrierstandards werden die Bestimmungsgrenzen abgeschätzt. Für die meisten VOC kann eine Bestimmungsgrenze von 2 - 5 µg/m³ erreicht werden. Durch eine Erhöhung der Probenahmemenge bei Komponenten mit einer höheren Bestimmungsgrenze lassen sich möglicherweise auch von diesen Komponenten niedrigere Konzentrationen in Bereich von wenigen µg/m³ bestimmen. Einige wenige, meist polare, Verbindungen erreichen mit dem hier eingesetzten Verfahren höhere Bestimmungsgrenzen.

Ergebnisse

In den Tabellen 15 bis 18 sind die Ergebnisse der festgestellten Emissionen in die Prüfkammerluft aufgelistet. Erfreulicherweise wurde die Emissionsarmut, die bereits bei den Screeningtests der Ausgangsmaterialien (UAP 2.3) festgestellt wurde, bestätigt. Lediglich bei den Lehmputzmörteln M2 und M8 konnte am 3. Tag nach der Beladung (entspricht in der Praxis dem 3. Tag nach Auftrage auf die Wand) das VOC 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan (Isododecan) in Spuren bestimmt werden. Bereits am 7. Tag war es kaum mehr nachweisbar. Ähnlich verhält es sich für die übrigen in den Tabellen aufgeführten Verbindungen, deren Signale zwar über der Nachweis-, jedoch unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Ihre Herkunft ist unklar. Aufgrund des schnellen Abklingens der Konzentrationen über die Zeit, aber auch aufgrund der niedrigen bzw. kaum bestimmbaren Konzentrationen, kann der Einsatz sämtlicher Materialien im Innenraum als unbedenklich eingestuft werden.

Tabelle 17 Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „M2"- Lehmputzmörtel über einen Zeitraum von 7 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)	
	PN-Tag	*3 d*	*7 d*
Heptane, 2,2,4,6,6-pentamethyl-	13475-82-6	7,6	*< BG*
1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	*< BG*	*< BG*

Tabelle 18: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „M8"- Lehmputzmörtel über einen Zeitraum von 7 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)	
	PN-Tag	*3 d*	*7 d*
Heptane, 2,2,4,6,6-pentamethyl-	13475-82-6	10,7	*< BG*
1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	*< BG*	*< BG*

Tabelle 19: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „S2"- Lehmsteine über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)	
	PN-Tag	*3 d*	*9 d*
Methyl methacrylate	80-62-6	*< BG*	*< BG*
Benzaldehyde	100-52-7	*< BG*	*< BG*

Tabelle 20: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „S8"- Lehmsteine über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³

Substanz	CAS Nr.	Konzentration (µg/m³)	
	PN-Tag	*3 d*	*9 d*
Methyl methacrylate	80-62-6	*< BG*	*< BG*
Benzaldehyde	100-52-7	*< BG*	*< BG*

AP 3 – Material- und Baustoffentwicklung & -prüfung

Foto: Daniela Friebel

Abbildung 27: Druckfestigkeitsprüfung im Lehmlabor

Das AP 3 befasst sich mit der Material- und Baustoffentwicklung. In einer ersten Abstimmungsrunde wurden von der Firma feess diverse Rezyklate als potenzielle Produkte für die Entwicklung von Lehmbaustoffen angeboten. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Materialien, die bisher aufgrund der derzeitigen Normung (Stand 2023) keine Anwendung in der Wiederverwertung finden. Auf lange Sicht müssen die Ausgangsstoffe meist deponiert werden.

Für das Vorhaben wurden vorerst sechs verschiedene Materialien bereitgestellt. Dabei wurden ca. 29 kg an das Konsortium geschickt und eine Menge von ca. 1 t bei den RC-Sanden und 0,5 t bei den Schluffen und Lehmen für eine potenzielle Weiterentwicklung durch die Firma vorgehalten. Bei den Proben handelt es sich um bestimmte Chargen, die immer nur für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung stehen. Für das Projekt ist zwar vorerst entscheidend, dass eine mögliche Nutzung der spezifischen Produkte durch die jeweiligen Tests gesichert wird, für eine Anwendung im Industriemaßstab müsste jedoch fortwährend die Qualitätssicherung durch Untersuchungen, die nach einem noch zu entwickelnden Prüfschema sichergestellt werden.

Im Projektverlauf wurden insgesamt dreimal verschiedene Materialien zur Verfügung gestellt, die im Folgenden beschrieben sind. Die Proben wurden in zwei Lieferungen in Blecheimern verschickt. 9 kg wurden an ZRS-Ingenieure verschickt und von dort aus an die BAM und das NBL verteilt. 20 kg wurden direkt an Claytec versandt.

Nach ersten sensorischen Voruntersuchungen, die im Folgenden beschrieben werden, wurden zusätzliche Materialien im Konsortium verteilt. Ausschlaggebend dafür waren die in den ursprünglichen Proben festgestellten Defizite, die im Weiteren beschrieben werden.

Tabelle 21: Materialbereitstellung 1

Pos.	Datum Charge	Bezeichnung	Menge BAM	kg ZRSI	NBL	CLAY
1.1	Apr-Mai22	Betonsand 0/2	3	5	1	20
1.2	Apr-Mai22	NKA-Sand 0/2	3	5	1	20
1.3	Apr-Mai22	Baustoffsand 0/2	3	5	1	20
2.1	Apr-Mai22	NKA-Schluff aus Boden	3	5	1	20
2.2	Apr-Mai22	NKA-Schluff aus Boden- Bauschuttgemisch	3	5	1	20
2.3	Apr-Mai22	Naturbelassener Filderlehm	3	5	1	20

Betonsand 0/2 (1.1)

Der Betonsand wird aus Betonbruch hergestellt. Dabei werden größere Abbruchteile per LKW auf das Werksgelände gefahren. Die Bewehrung ist dabei in aller Regel noch enthalten. Über einen Radlader werden die Bruchstücke in einen Prallbrecher gefüllt. Bei normal bewehrten Bauteilen wird die Bewehrung über Überbandmagneten getrennt. Bei hochbewehrten Bauteilen wird eine Vorzerkleinerung vorgeschaltet. Pro Arbeitstag können ca. 700 t Material erzeugt werden. Dabei fallen ca. 20 % mit der Bezeichnung Betonsand 0/2 an, was ca. 140 t entspricht. Die unterschiedlichen Korngrößen werden entsprechend im Brecher gesiebt und zu unterschiedlichen Produkten getrennt.

NKA-Sand 0/2 (1.2)

Der NKA-Sand ist ein Produkt, welches aus der Nassklassierungsanlage hervorgeht. Dabei wird das Aufgabematerial, bei welchem es sich um Boden oder Boden-Bauschuttgemische handelt, händisch vorsortiert. Größere Lehmklumpen, werden dabei vom Förderband genommen und in Container geworfen. Dies dient der Schonung der Anlage durch ansonsten zu hohe Tonanteile, die die Anlage verstopfen könnten. Innerhalb der Anlage wird dann das Material unter Zugabe von Wasser in seine verschiedenen Korngrößen getrennt und klassiert. Für den Prozess muss dem Wasser zusätzlich ein Flockungsmittel hinzugefügt werden, bei dem es sich um ein anionisches Polyacrylamid handelt. Dieses sorgt dafür, dass sich die Bestandteile entsprechend trennen können. Das Flockungsmittel ist im Endprodukt nachweisbar.

Baustoffsand 0/2 (1.3)

Der Baustoffsand wird wie der Betonsand aufgearbeitet. Bei dem Aufgabematerial handelt es sich jedoch um andere mineralische Baustoffe als Beton. Überwiegend handelt es sich um Mauerwerksbruch.

NKA-Schluff aus Boden (2.1)

Dieses Produkt wird entsprechend des NKA-Sandes erzeugt und beinhaltet ein Aufgabematerial aus Bodenaushub.

NKA-Schluff aus Boden-Bauschuttgemisch (2.2)

Dieses Produkt wird entsprechend des NKA-Sandes erzeugt und beinhaltet ein Aufgabematerial aus einem Boden- und Bauschuttgemisch.

Filderlehm (2.3)

Bei dem Filderlehm handelt es sich um den Bodenaushub einer regionalen Baumaßnahme. Für die Region üblich handelt es sich dabei um einen sehr fruchtbaren Boden, bei welchem Haarwurzeln bis in ca. 8 m Tiefe vorkommen. Entsprechend hoch ist der Organik-Anteil der Probe. Der Aushub wird auf der Baustelle ausgehoben und per LKW auf das Werksgelände gefahren und dort in Mieten gelagert.

Tabelle 22: Materialbereitstellung 2

Pos.	Datum Charge	Bezeichnung
1.1a	Apr-Mai22	Betonsand aus 1.1, 0,25-2mm (gesiebt)
1.5	Nov22	Carbonatisierter Betonsand
2.4	Jun-Jul22	Steinfreier Boden ohne Kalk
1.4	Jun-Jul22	Bodenaushub (Grobanteil muss vor Prüfung entfernt werden, s.1.4a-c)
1.4a	Jun-Jul22	Bodenaushub <0,25mm (gesiebt)
1.4b	Jun-Jul22	Bodenaushub 0,25-4mm (gesiebt)
1.4c	Jun-Jul22	Bodenaushub <4mm (gesiebt)

Carbonatisierter Betonsand (1.5)

Bei dem carbonatisierten Betonsand handelt es sich um das Material 1.3 bei welchem die Umwandlung von Calciumhydroxid (Portlandit) in Calciumcarbonat (Kalkstein) im Beton abgeschlossen ist. [45] Im weiteren Verlauf ist zu klären, wie dieses Verfahren konkret durchgeführt wird. Ein Beispiel ist das Projekt „CORE – Ressourcenschonender und klimaoptimierter Beton in Berlin" bei dem die Gesteinskörnung in Containern mit CO_2 begast wurde, um den Carbonatisierungs-Prozess zu beschleunigen. [46] Die abgeschlossene Reaktion könnte potenziell interessant sein, da es Hinweise darauf gibt, dass eine

Wechselwirkung zwischen Tonmineralen und reaktionsfähigen Bestandteilen im Betonsand Auswirkungen auf die Festigkeit des Baustoffs haben könnte [47].

Steinfreier Boden ohne Kalk (2.4)

Der steinfreie Boden ohne Kalk ist ein Material mit sehr hohem Schluff- oder Tonanteil, welcher ebenfalls als Baugrubenaushub anfällt.

Bodenaushub (1.4)

Dieses Material wird i.d.R. in die Nassklassierung gegeben. Es handelt sich um ein heterogenes Material mit z.T. verhältnismäßig großem Kornanteil (ca. 30-60 mm). In dem Material sind gröbere Lehmklumpen enthalten, die vor der Klassierung händisch aussortiert werden (s. NKA-Sand). Bei der Probe Bodenaushub handelt es sich um das Aufgabematerial für die Nassklassierung. Ein Flockungsmittel ist also noch nicht enthalten. In der Probe war ein sehr hoher Anteil an Körnung > 4 mm enthalten, der im Vorfeld ausgesiebt wurde. Die Probe 1.4c bildet das gesamte Spektrum der Probe ab. 1.4b beinhaltet den Bereich 0,25-4 mm. Über die Probe 1.4a soll nachgewiesen werden, dass die Schadstoffkonzentration in Abhängigkeit mit dem Anteil der Schadstoffkonzentration steht. Es muss erwähnt werden, dass es sich bei der Probe um eine stark verklumpte Probe handelt. Während des Siebverfahrens konnten nicht alle Feinstanteile vollständig getrennt werden. Dies passiert im Verfahren der Nassklassierung.

Tabelle 23: Zusätzliche Materialien

Pos.	Datum Charge	Bezeichnung
1.6	?	Feinstgut (von BAM)
1.7	?	Betonbrechsand (von BAM)
2.5	?	Bodenaushub (von TU Berlin)

Feinstgut (1.6)

Bei dem Feinstgut handelt es sich um ein Material, welches aus der Waschung hervorgeht.

Betonbrechsand (1.7)

Dieses Material wurde ähnlich wie die Probe 1.1 der Firma feess hergestellt.

Bodenaushub (2.5)

Bei diesem Material handelt es sich um sehr feines Bodenmaterial, welches im Rahmen des Forschungsprojekts RE4 untersucht wurde.

UAP 3.1 – Sensorische Bewertung der Ausgangsmaterialien

Im Rahmen der Vorbewertung der Ausgangsstoffe wurden wesentliche mechanische Parameter der Ausgangsstoffe einer sensorischen Voruntersuchung unterzogen, um grobe Abschätzungen für die potentielle Eignung aus mechanischer Sicht treffen zu können. In weitere Überlegungen hinsichtlich Materialentwicklung wurden potentielle (im Rahmen von AP 2 dann tatsächlich zu ermittelnde) Schadstoffe und sonstige Stoffe mit negativen Auswirkungen bzw. negativen Wechselwirkungen einbezogen.

Es wurden die sensorischen „Feldversuche" nach Lehmbau Regeln [48] ausgeführt. Durchgeführt wurden die Kugelform- und Kugelfallprobe, der Schneideversuch sowie die Reibe- und Waschprobe. Anhand dieser Prüfungen kann bei Vorliegen entsprechender Erfahrung die Eignung als Bindemittel im Lehmbaustoff abgeschätzt werden, ohne die aufwändigere Bindekraftprüfung nach Lehmbau Regeln vorzunehmen. Die sensorische Untersuchung der potenziellen mineralischen Zusatzstoffe (Sand) bezog sich auf die optische Bewertung der Kornverteilung und Kornform. Eine gleichmäßige Kornverteilung und eine scharfkantige, raue Kornform sind positiv zu bewerten, da dies bei dem vergleichsweise schwachen Bindemittel Lehm von wesentlicher Bedeutung für den Gefügezusammenhalt ist [49].

Ergebnisse

Es wurde festgestellt, dass die durch Nassklassierung gewonnenen Feinstfraktionen, die als Bindemittel eingesetzt werden sollten (Probe 2.1 und 2.2), bei hohem Feinstanteil gleichzeitig eine sehr geringe Bindekraft aufwiesen, was ungewöhnlich ist. Die in Rezyklatgewinnung eingesetzten Flockungsmittel wirken sich negativ auf die Bindekraft der Tonfraktion aus. Die derart gewonnenen Feinststoffe sind aus mechanischer Sicht als Bindemittel weitgehend ungeeignet und könnten lediglich zu geringen Anteilen als Füllstoff beigemengt werden. Jedoch ist dabei problematisch, dass die eingesetzten Flockungsmittel nicht zu den zugelassenen Bestandteilen eines Lehmbaustoffs nach den jeweiligen DIN-Normen gehören.

Natürliche Lehmvorkommen, die aus dem Einzugsgebiet der Fa. Fees stammen und untersucht wurden, zeigen eine gute Eignung als Baulehm. Zwar handelt es sich dabei nicht um Rezyklate, aber um Lehm aus potenziellen Baugruben, der sonst einer Deponierung zugeführt würde.

Die angestellten Untersuchungen zur mechanischen Eignung der rezyklierten Gesteinskörnung ergab ein positives Bild, da durch die Brechvorgänge scharfkantige Körnungen generiert werden, die sich im Lehmbaustoff positiv auf die Festigkeitsparameter auswirken. Gesteinskörnung aus gebrochenem Beton kann sich im Lehmbaustoff jedoch auch negativ auf die Festigkeit auswirken, wenn der Beton nicht „durchkarbonatisiert" war. Mit derartiger Gesteinskörnung entstehen chemische Wechselwirkungen mit den Tonmineralen, die deren Bindemittelwirkung blockieren [50]. Angenommen, dass diesem Rezyklat aus gebrochenem Beton genug Zeit zur Nachkarbonatisierung gegeben wird und damit dieser negative Effekt nicht auftritt, dann kann diese Gesteinskörnung infolge ihrer rauen und scharfkantigen Form eine hohe Festigkeit bewirken, jedoch lassen sich in der Oberflächenbearbeitung keine glatten Flächen erzielen. Eine Eignung als Unterputz wäre aber gegeben und als positiv einzustufen.

Die angestellten Untersuchungen zu bauschädlichen Salzen zeigen vor allem kritische Werte im Bereich der Sulfate, was auf Gipsbaustoffe im Bauschutt zurückzuführen ist. Für alle Lehmbaustoffe gelten strenge, durch die jeweiligen DIN-Normen definierte Grenzwerte für bauschädliche Salze. Skaliert man die Grenzwerte mit den vorhandenen Anteilen in den Recyclaten ergibt sich eine deutlich reduzierte mögliche Beimischungsquote.

UAP 3.2 – Rezeptur Entwicklung

Voruntersuchung

In einem ersten Schritt wurden Versuche von Mischungen für Lehmputzmörtel hergestellt, die Aufschluss über die mögliche Verarbeitbarkeit, aber auch das Schwindverhalten der Materialien geben sollen. In diesen Versuchen wird außerdem das Recyclingpotenzial untersucht, also ob die Mischungen reversibel bleiben. Für die Versuche wurden die Materialien aus Tabelle 24 verwendet.
Die Ausgangsmaterialien wurden unabhängig von ersten Erkenntnissen der Schadstoffanalysen oder der sensorischen Einschätzung in verschiedenen Mischungsverhältnissen untereinander kombiniert. Dabei wurde immer jeweils ein Bindemittel (Schluff oder Lehm) mit einem Zusatzstoff (Sand) kombiniert. Der unten stehenden Tabelle sind die Mischungsverhältnisse zu entnehmen. Für diese Versuche war vorerst die mechanische Verarbeitbarkeit entscheidend, unabhängig von weiteren Einflussfaktoren.

Tabelle 24: Mischungsverhältnis in Gramm

Nr.	2.1 NKA-S-B	2.3 Filderlehm	2.2 NKA-S-BB	1.3 Bau-S	1.2 NKA-Sand	1.1 Beton-S
1	400				600	
2	400			600		
3	400					600
4			400		600	
5			400	600		
6			400			600
7		400			600	
8		400				600
9		400		600		

Die o.g. Mischungen wurden auf einer Lehmbauplatte mit einer Fläche von ca. 30 cm x 20 cm mit einer Putzdicke von ca. 10-15 mm aufgebracht.

Foto: Claytec

Abbildung 28: Putzträger und Probemischungen.

Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Materialien lassen sich aus mechanischer Sicht grundsätzlich alle untereinander zu einem Putzmörtel verarbeiten. Die Proben 2.1, 2.2 und 3.1 sind sehr fett. Die Rezepturen wurden in den ersten Versuchen dahingehend nicht optimiert und bilden daher beim Trocknen Schwindrisse aus. Alle Mischungen bleiben reversibel. Die Probe 8 war nach erster Einschätzung nach die geschmeidigste. Die Proben 1, 2 und 3 zogen sehr schnell an und ließen sich nur schwer aufputzen. Im angerührten Zustand musste stetig Wasser hinzugegeben werden, um die Probe verarbeitbar zu halten.

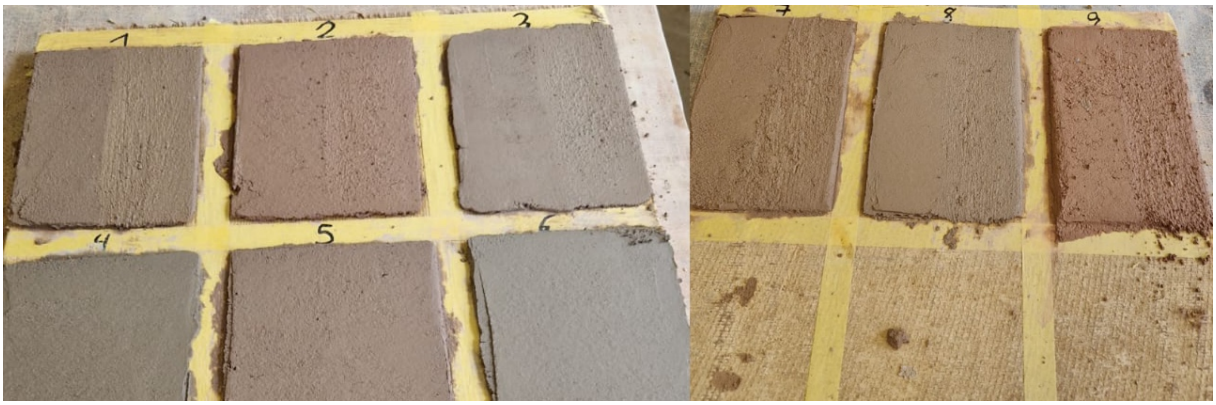


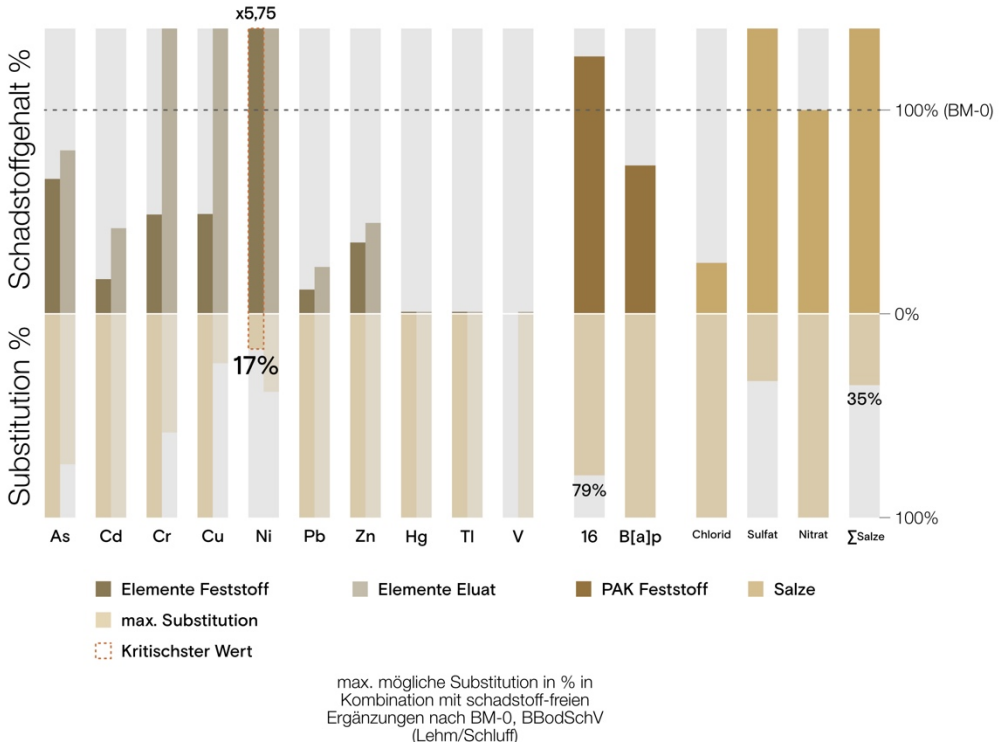
Foto: Claytec

Abbildung 29: Aufgetragene Putzmischungen

Grundlage der Rezepturentwicklung

Nachdem die Putzmischungen aus mechanischer Sicht erprobt wurden, wurden auf Basis aller Voruntersuchungen mögliche Rezepturen entwickelt.

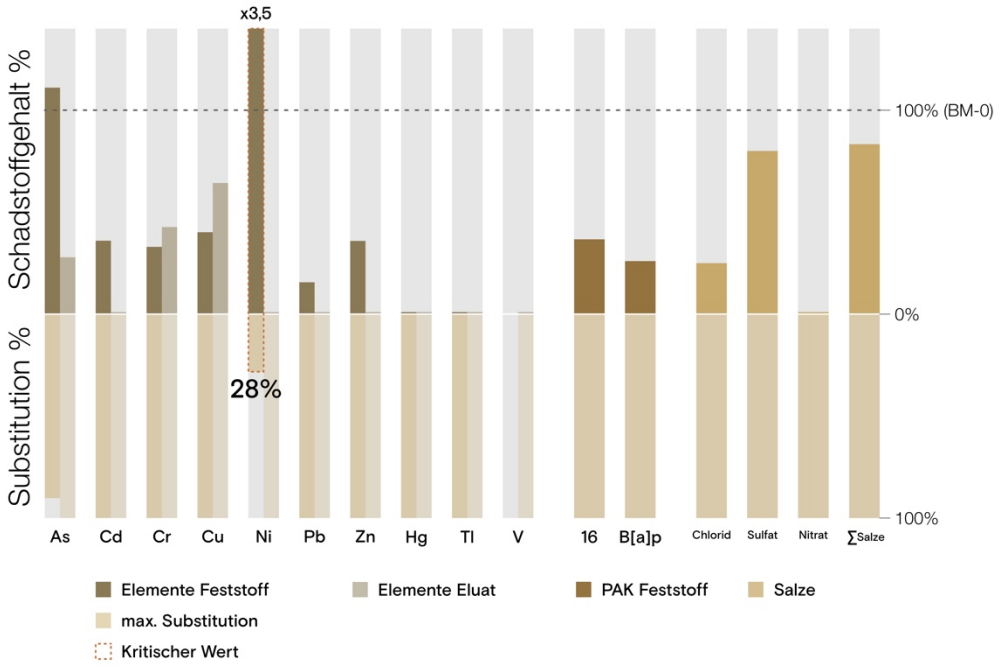
Anhand einer Übersichtstabelle über die Schadstoffanteile der untersuchten Materialien wurde ausgehend von schadstofffreien Primärrohstoffen ein maximaler Substitutionsanteil der Rezyklate definiert. In Abbildung 30 und den folgenden Darstellungen sind die Schadstoffuntersuchungen grafisch zusammengefasst. Anhand der Grafik kann abgelesen werden, in welcher Konzentration das Rezyklat zu einer neuen Mischung hinzugefügt werden kann. Im oberen Teil der Grafik ist der jeweilige Schadstoffgehalt in Bezug auf die Grenzwerte nach BM-0 dargestellt. Liegt der jeweilige Balken oberhalb der gestrichelten Linie, liegt eine Grenzwert-Überschreitung vor. In direkter Beziehung dazu ist auf dem unteren Teil der Grafik die daraus resultierende Substitutionsrate in Prozent abgebildet.



Grafik: NBL

Abbildung 30: Schadstoffgehalt Betonsand (1.1)

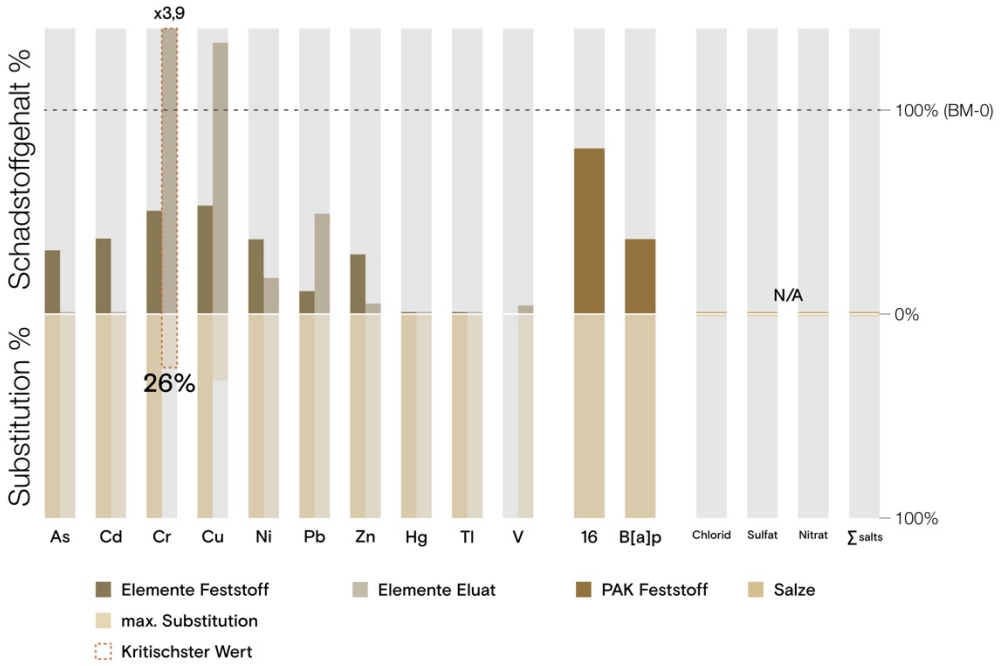
Bei dem Betonsand ist der Nickel-Feststoffwert das ausschlaggebende Kriterium. Der zweite Wert, der die maximale Substitution einschränkt, ist die Summe der Bauschädlichen Salze; im Speziellen der Sulfatgehalt.



Grafik: NBL

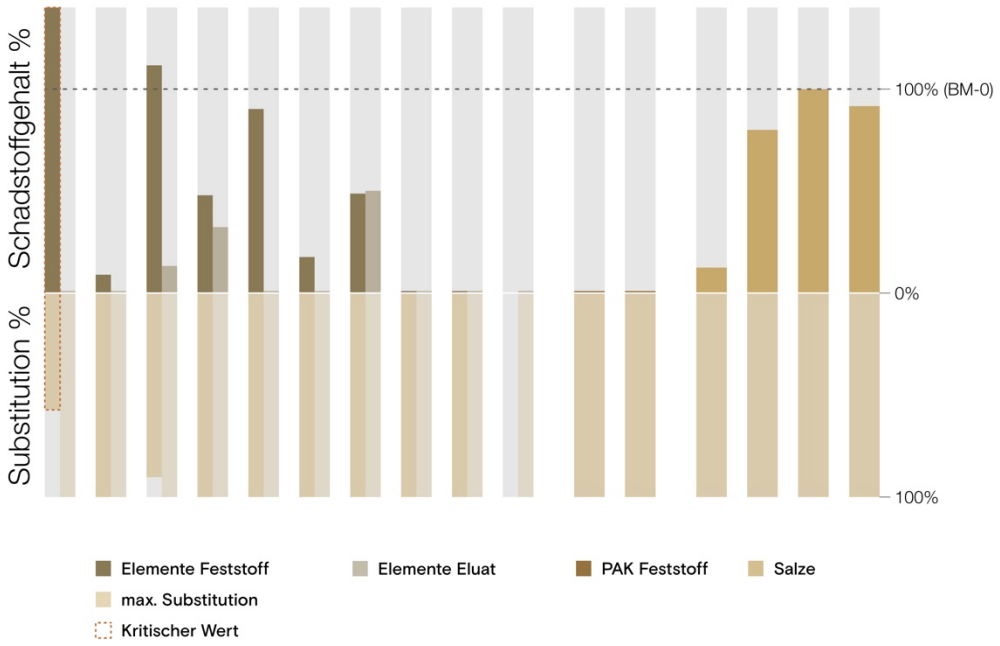
Abbildung 31: Schadstoffgehalt NKA-Sand (1.3)

Bei dem NKA-Sand ist ebenfalls aufgrund der erhöhten Nickel-Konzentration im Feststoff eine maximale Substitution von 28 % möglich.



Grafik: NBL

Abbildung 32: Schadstoffgehalt Carbonatisierter Betonsand (1.5)



Grafik: NBL

Abbildung 33: Schadstoffgehalt Filderlehm

Der Filderlehm kann zu maximal 57 % einer Mischung beigefügt werden. Dies ist jedoch für sehr viele Anwendungsmöglichkeiten geeignet, da die meisten Lehmmischungen Bindemittelgehalte unter 57 % haben.

Konzeption der Rezepturen

Es wurden acht verschiedene Lehmputzmörtel-Mischungen konzipiert. Diese schöpfen die jeweilige maximale Substitutionsrate der Zuschlagstoffe aus. Das Schadstoffprofil der Sande ergänzt sich so, dass diese auch untereinander kombiniert werden können.

Proben-bezeichnung	Mischungsverhältnis Rezeptur														Materialbeschreibung
	Betonsand 1.1		NKA-Sand 1.2		Carbo. Betonsand 1.5		Sand ZRS Flusssand		Bodenaushub 1.4 c		Filder 2.3		Baulehm Claytec		
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	
21055_M1	340	17	-	-	-	-	1060	53	-	-	-	-	600	30	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M2	-	-	610	28	-	-	840	39	-	-	-	-	700	33	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M3	-	-	-	-	273	13	1140	54	-	-	-	-	687	33	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M4	374	17	616	28	-	-	500	23	-	-	-	-	710	32	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M5	-	-	672	28	312	13	580	24	-	-	-	-	816	35	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M6	340	17	560	28	-	-	500	25	-	-	600	30	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M7	-	-	560	28	260	13	580	29	-	-	600	30	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M8	340	17,5	560	29	450	23	-	-	-	-	600	30,5	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz

Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 34: Mischungen

Aus den Mischungen wurden je drei Mörtelprismen für weitere Tests angefertigt.

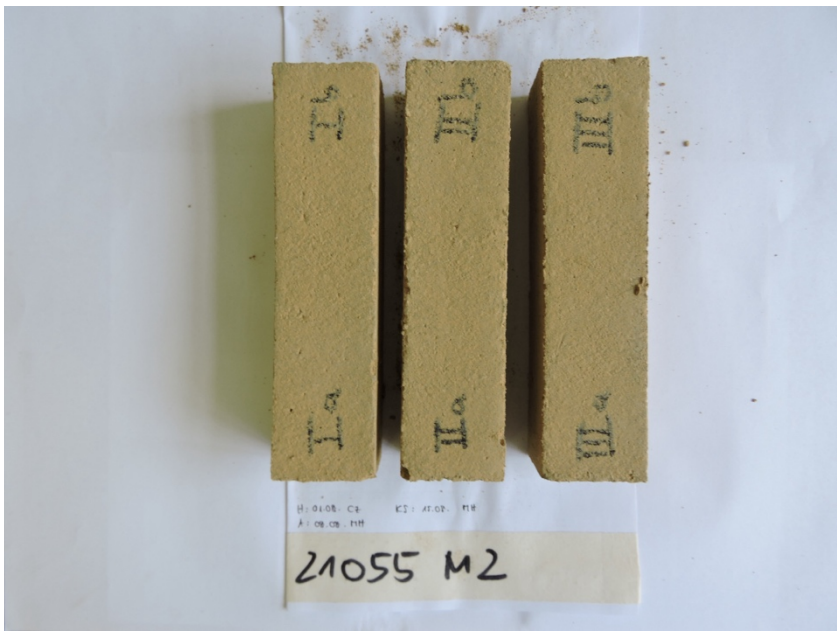


Foto: ZRS Ingenieure

Abbildung 35: Prismen LPM Mischung M2

Ausgehend von den Ergebnissen der Mischungen für den LPM wurde auf eine Variantenerstellung verzichtet und es wurden die Mischungen M2 und M8 als Grundlage für zwei verschiedene Steinmischung S2 und S8 gewählt. Dies wurde aufgrund der Festigkeitswerte der LPM Mischungen entschieden (s. Ergebnisse UAP 3.3). Im Vergleich zu den Putzmischungen wurde die Rezeptur mit einem höheren Bindemittelanteil konzipiert, da Lehmsteine außerhalb des Bauteils schwinden und somit fetter eingestellt werden können, was sich positiv auf die Festigkeit und das Wasserdampfsorptionsverhalten auswirkt.

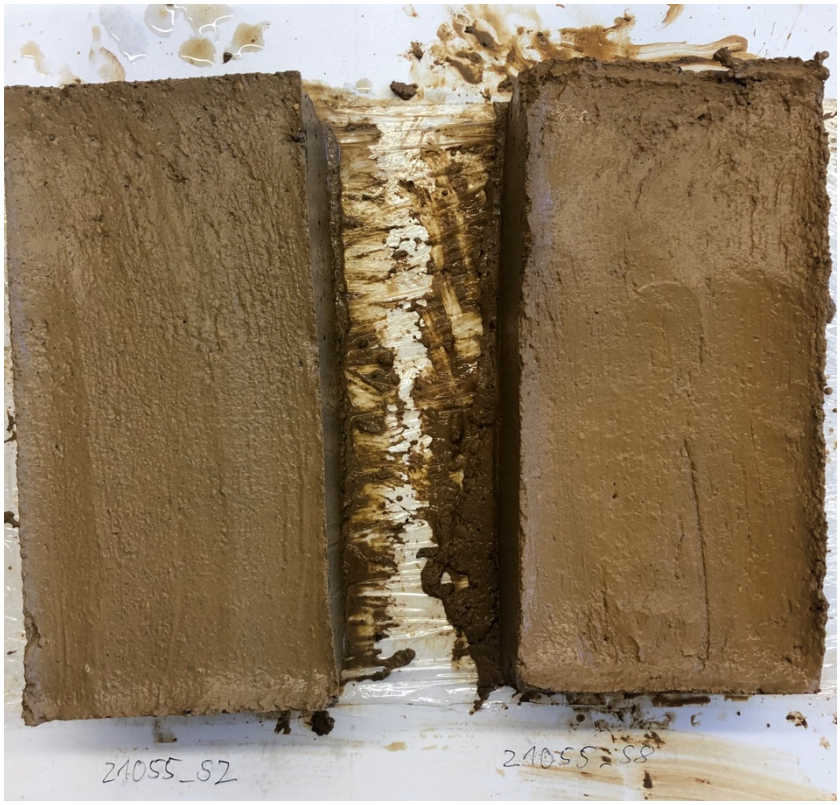


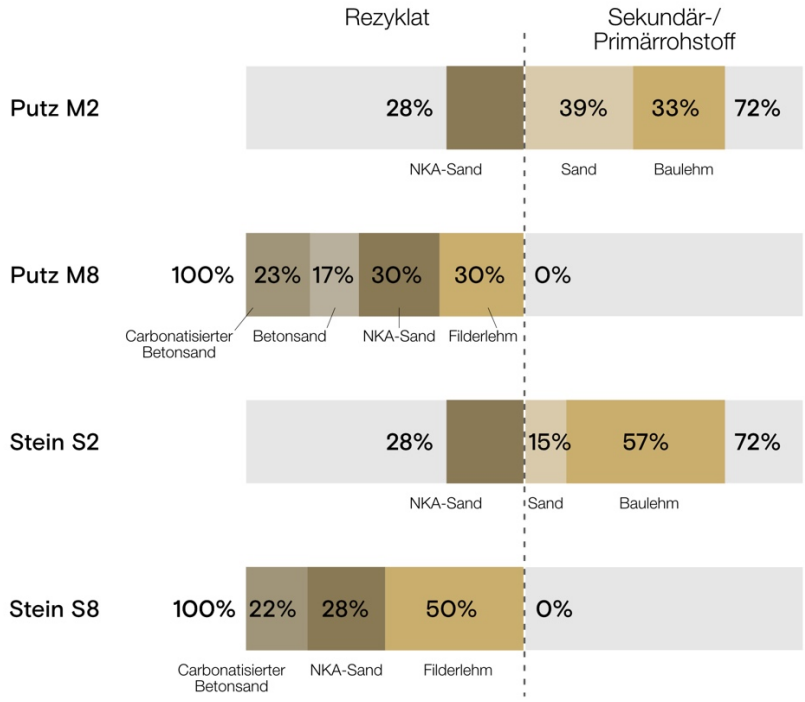
Foto: NBL

Abbildung 36: Prototyp formgeschlagener Lehmstein S2 und S8 direkt nach Ausschalen

Anhand der Voruntersuchung wurde eine Abschätzung über die Eignung der Mischung getroffen. Diese wurde dann an die Firma Claytec weitergegeben, die eine Serie von insgesamt jeweils 52 Stück pro Mischung produziert hat. Die Lehmsteine wurden wie bei Nullserien üblich formgeschlagen, d.h. händisch mittels Einwerfen in eine Holzform, gefertigt. Das Material wurde per Rührwerk angemischt, plastisch durchgearbeitet und in die zuvor gewässerten Formen eingeworfen; überschüssiges Material wurde abgezogen. Die Fertigung entsprach somit im Labormaßstab der Herstellung eines „formgeschlagenen Lehmstein", wie er in DIN 18942-1 Lehmbaustoffe und Lehmbauprodukte – Teil 1: Begriffe definiert ist: „Lehmstein, der durch händisches oder mechanisiertes „Patzen" (schwungvolles Einwerfen) oder Rütteln in eine Schalung geformt und anschließend ohne Nachverdichtung abgestrichen wird." Die Mischung S2 ließ sich so wie bei anderen Lehmmischungen bekannt verarbeiten. Die Mischung S8 mit hohem Bruchkornanteil war im Handling aufgrund der scharfen Körnung unangenehm. Für eine industrielle Produktion wäre zu prüfen, inwieweit die scharfe Korngeometrie des Materials zu erhöhtem Verschleiß an den in der Ziegelindustrie üblichen Formungswerkzeugen wie Strangpressen oder Mundstücken führt.

Die Steine wurden direkt ausgeworfen und nach 5-6 Tagen zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Trocknung hochkant gestellt. Die Trocknung bis zur Gleichgewichtsfeuchte nahm in der solaren Trocknung des Herstellungsortes die Zeit bis zum Januar 2024 in Anspruch; dann wurden die Steine für die Prüfungen versendet.

In Abbildung 37 können die finalen Mischungen entnommen werden. Es wurden jeweils zwei Mischungen für den LPM und zwei Mischungen für die LS erstellt. Dabei sind die Mischungen M2 und S2 die mit den besten mechanischen Eigenschaften. Die Mischungen M8 und S8 wurden zu 100 % aus Materialien aus dem Projekt erzeugt.



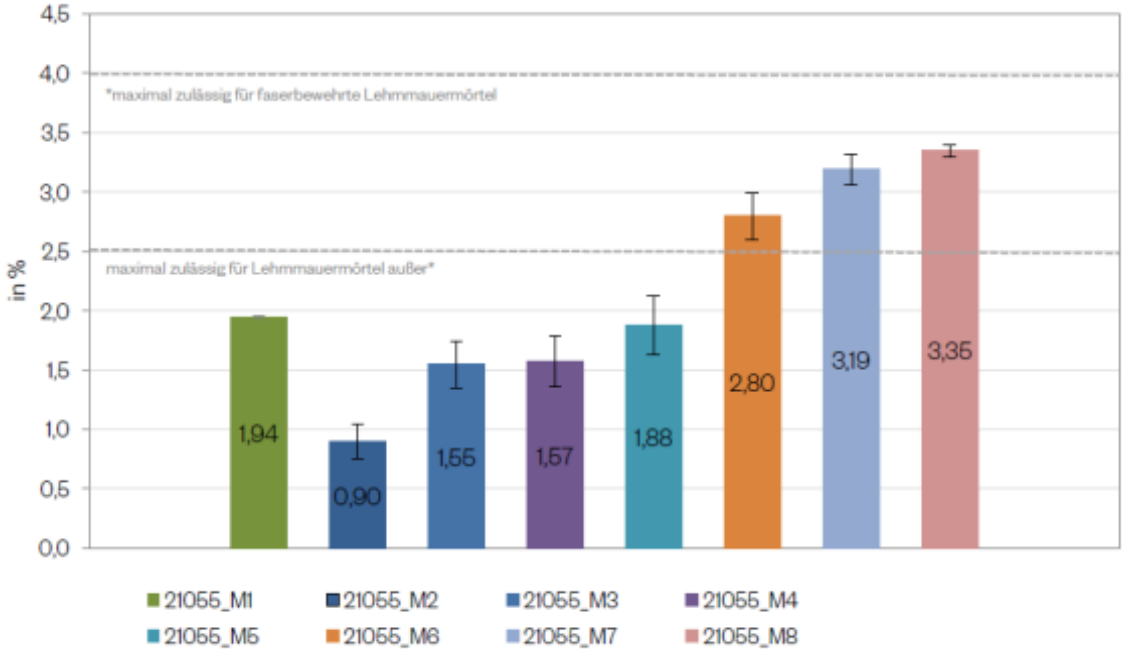
Grafik: NBL

Abbildung 37: Rezepturen von Lehmputzmörtel und -Steinen

UAP 3.3 – Baustoffprüfung nach DIN 18945 und 18947 [8] [10]

Prüfung der Lehmputzmörtel

Damit die Putzflächen nicht unzulässig reißen, dürfen rein mineralische Dicklagen-Lehmputze nach DIN 18947 ein Schwindmaß von maximal 2,0 % und mineralische Dünnlagen-Putzmörtel maximal 3,0 % aufweisen [10]. Da die Versuchsmischungen alle mit eher groben Zusatzstoffen gemischt wurden, kommt nur die Dicklagenverarbeitung in Frage. Maßgebend ist also ein maximales Schwindmaß von 2,0 %.



Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 38: Ergebnisse der Schwindmaßprüfung M1 bis M8 mit zusätzlicher Kennzeichnung der Schwindmaß-Grenzwerte für Lehmmauermörtel. Die Grenze für Lehmputzmörtel beträgt maximal 2,0 %

Es zeigt sich, dass die aufgrund der vergleichsweise niedrigen erreichten Festigkeiten der Mischungen M1 bis M5 fetter (also mit höherem Bindemittelanteil) eingestellten Mischungen M6 bis M8 ein zu hohes Schwindmaß aufweisen.

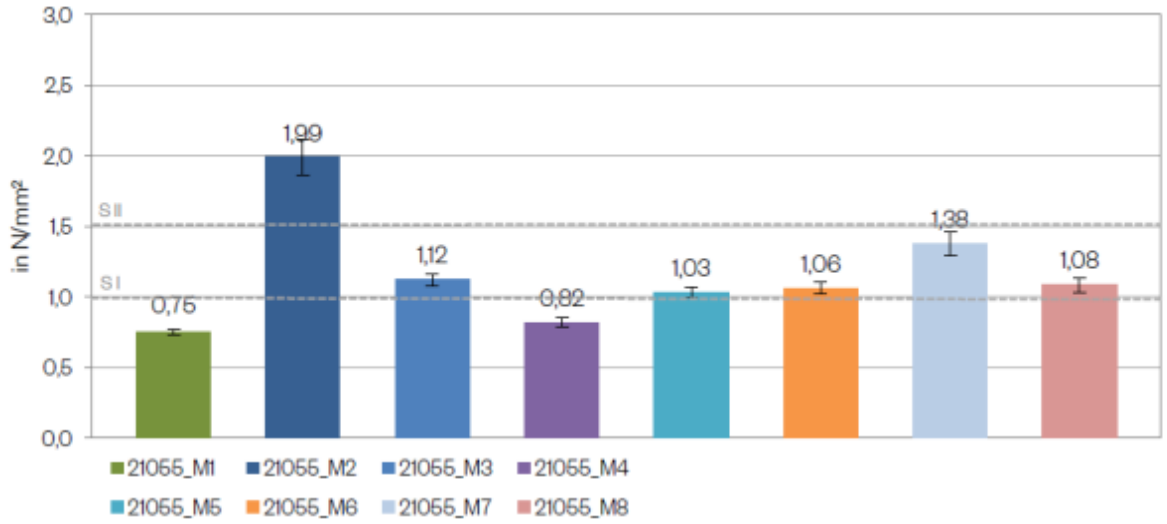
Lehmputzmörtel werden nach DIN 18947 in die Festigkeitsklassen S I und S II unterteilt [10]. Lehmputze der niedrigeren Festigkeitsklasse S I dürfen nur in untergeordneten Räumen oder für untergeordnete Zwecke verwendet werden. Die Festigkeitsklassen werden über Mindestanforderungen der Druck-, Biegezug-, Haft- und Abriebfestigkeit definiert. Die jeweiligen Mindestwerte der Festigkeitsklassen sind aus der unteren Abbildung ersichtlich.

	1	2	3	4	5
	Festigkeitsklasse	**Druckfestigkeit** N/mm^2	**Biegezugfestigkeit** N/mm^2	**Haftfestigkeit** N/mm^2	**Abrieb** g
1	S I	≥ 1,0	≥ 0,3	≥ 0,05	≤ 1,5
2	S II	≥ 1,5	≥ 0,7	≥ 0,10	≤ 0,7

Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 39: Festigkeitsklassen von Lehmputzmörteln nach DIN 18947

Als maßgebende Kriterien der Festigkeit wurden die Druck- und die Biegezugfestigkeit herangezogen und geprüft. Die Haftfestigkeit und die Abriebfestigkeit korrelieren in den allermeisten Fällen. Auf deren Ermittlung wurde deshalb verzichtet. Die erreichten Druckfestigkeiten sind aus Abbildung 40 ersichtlich.

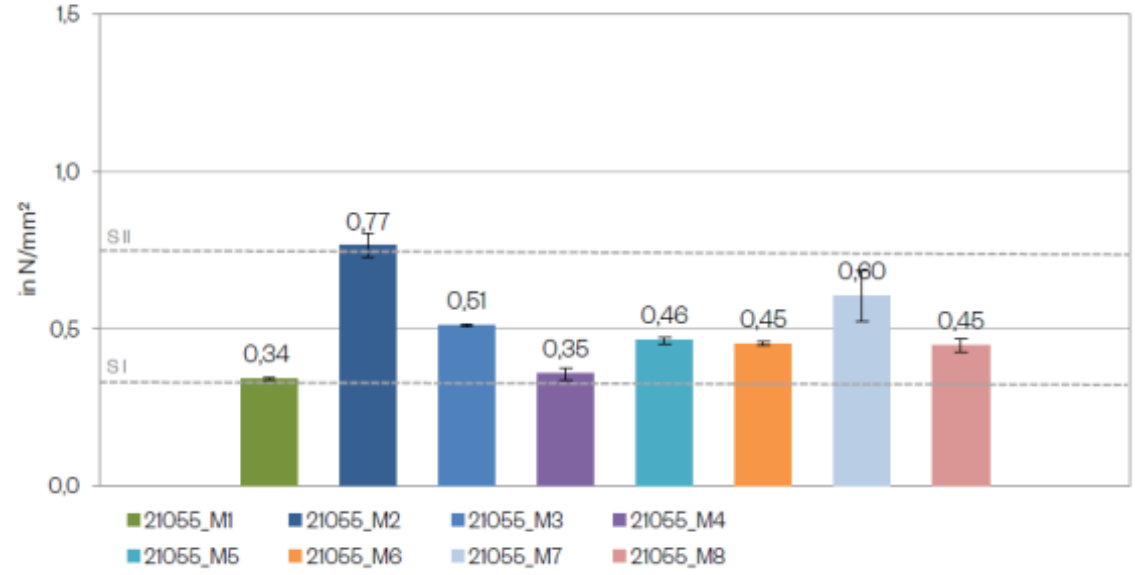


Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 40: Druckfestigkeitsprüfung M1 bis M8 mit eingetragenen Festigkeitsklassen SI und SII.

Demnach erfüllt nur die Mischung M2 die Mindestdruckfestigkeit der Festigkeitsklasse S II. Auffällig ist, dass die bewusst fetter eingestellten Mischungen M5 bis M8 die Mindestdruckfestigkeit verfehlen, insbesondere auch die aus 100 % rezyklierten Material hergestellte Mischung M8.

Bei der Biegezugfestigkeit zeigt sich ein fast identisches Bild (s. Abbildung 41). Auch hier weist lediglich die Mischung S2 eine ausreichende Festigkeit auf, um in die Festigkeitsklasse S II eingestuft werden zu können.



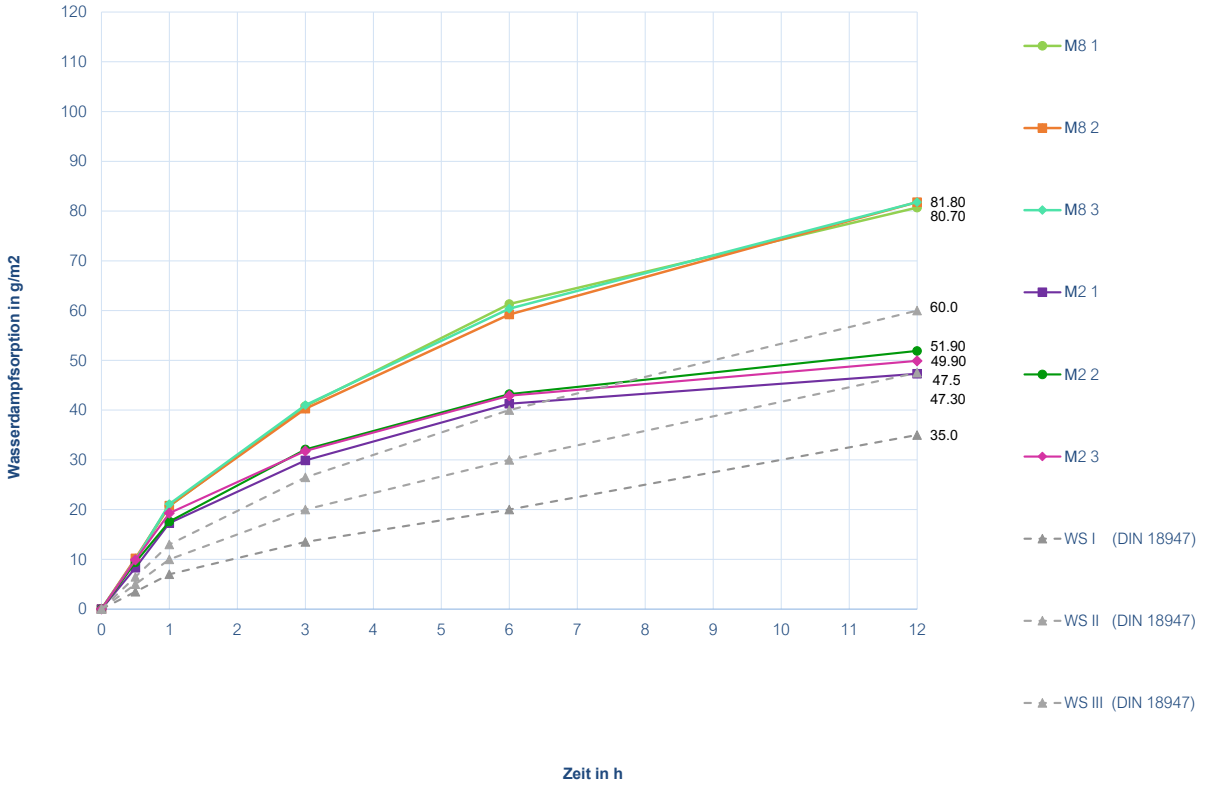
Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 41: Biegezugfestigkeitsprüfung M1 bis M8 mit eingetragenen Festigkeitsklassen SI und SII.

Offensichtlich weisen sowohl der rezyklierte Betonsand als auch der sogenannte Karbonatisierte Betonsand chemische Wechselwirkungen zu den Tonmineralen auf, die die Festigkeit der hergestellten Lehmproben negativ beeinflussen. Offensichtlich war der Karbonatisierungsprozess bei dem sogenannten Karbonatisierten Betonsand nicht abgeschlossen.

Wasserdampfadsorptionsklasse

Der Lehmputzmörtel M2 erreicht mit einem mittleren Wert von 49,7 g/m^2 nach 12h die Wasserdampfadsorptionsklasse WS II nach DIN 18947:2024-03 (Anhang A, Tabelle A.1). Der Lehmputzmörtel M8 erzielt die Klasse WS III mit einem Mittelwert von 81,4 g/m^2.



Grafik: NBL

Abbildung 42: Ergebnisse Wasserdampfadsorption

Prüfung der Lehmsteine

Foto: ZRS Ingenieure

Abbildung 43: Lehmsteine

Es wurde geprüft, ob die aus den Mischungen S2 und S8 hergestellten Lehmsteine den Anforderungen an tragende Lehmsteine der Anwendungsklasse II (witterungsgeschützte Anwendung) entsprechen, was der häufigsten Verwendung von Lehmsteinen entspricht. Es wurden folgende Prüfungen mittels der normativ geregelten Prüfverfahren nach DIN 18945 durchgeführt [8]:

Prüfung
Form, Lochung und Maße
Steinrohdichte
Druckfestigkeit
Brandverhalten
Verhalten unter Feuchteeinwirkung (AK)
Gehalt an bauschädlichen Salzen

Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 44: Durchgeführte Prüfungen

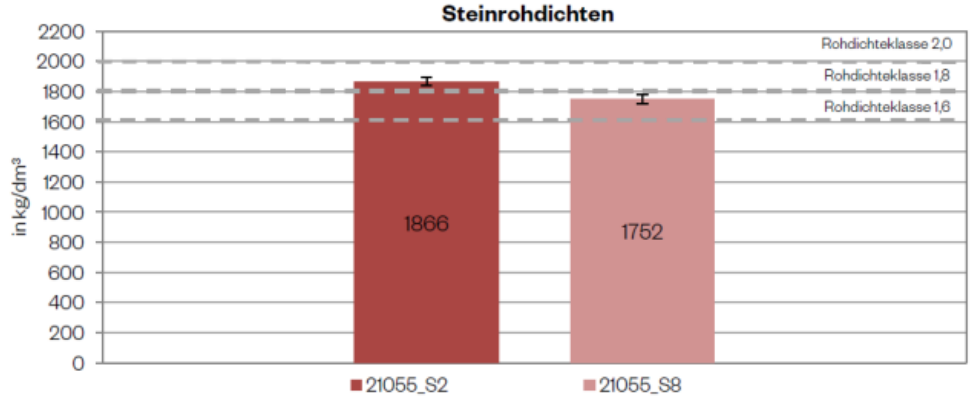
Form, Lochung und Maße

Die Lehmsteine sind Volllehmsteine, also ohne Lochung. Aufgrund des einfachen Herstellungsverfahrens wiesen sie Masstoleranzen auf, die über dem zulässigen Wert lagen. Dies war aber dem Verfahren und nicht den gegenständlichen Ausgangsstoffen und Mischungen geschuldet und würde in einer späteren Produktion nicht mehr auftreten.

Steinrohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstand

Anhand der ermittelten Steinrohdichten erfolgt die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Lehmsteine. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Lehmsteine angegeben.

Die ermittelten Steinrohdichten lag im üblichen Bereich der Rohdichteklasse 1,8 und 2,0. Ob eine höhere Rezyklatquote zu einer geringeren Rohdichte führt, müsste weiterhin geprüft werden.



Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 45: Rohdichte der hergestellten Lehmsteine

Anhand der Rohdichte erfolgte über die Tabellen der Lehmbau Regeln die Einstufung bezüglich der Wärmeleitfähigkeit und des Wasserdampfdiffussionswiderstandes.

Eigenschaften	21055_S2	21055_S8
Stoffrohdichte in kg/m³	1866	1752
Wärmeleitfähigkeit λ in W/m·K	0,91	0,73
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	5/10	

Grafik: ZRS Ingenieure

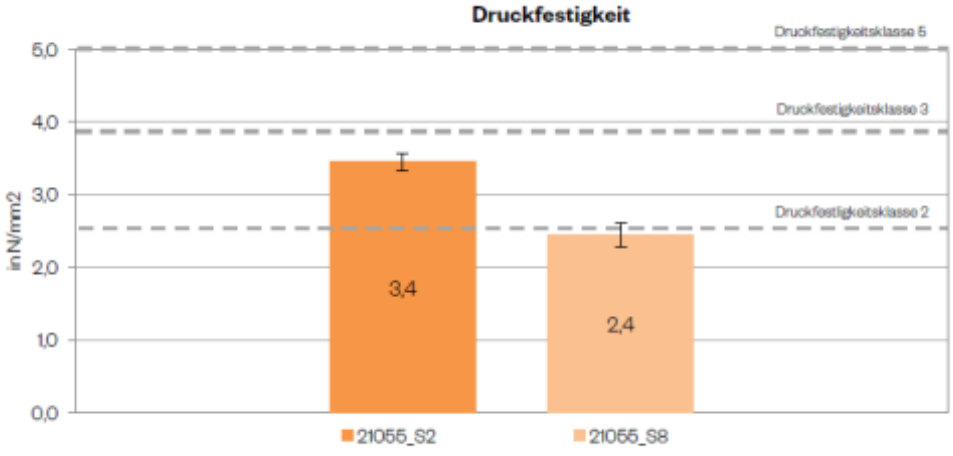
Abbildung 46: Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffussionswiderstandszahl der Lehmsteinmischungen

Druckfestigkeitsklasse

Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 47: Druckfestigkeits-Test

Die Druckfestigkeit der aus der Mischung S2 hergestellten Lehmsteine ist deutlich höher als die aus der Mischung S8. Die Ergebnisse sind aus der Abbildung 48 ersichtlich.



Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 48: Ergebnisse der Druckfestigkeit der Lehmsteinmischungen S2 und S8, eingeordnet mit den jeweiligen Klassengrenzen.

Die Lehmsteine der Mischung S8 verfehlen damit knapp die Anforderungen an die Druckfestigkeitsklasse 2, die die Mindestdruckfestigkeit für tragendes Lehmsteinmauerwerk darstellt. Der Lehmstein könnte

aber dennoch für schwere nichttragende Ausfachung im modernen Holzbau eingesetzt werden, was ein mindestens ebenso wichtiges Einsatzgebiet darstellt. Der Einsatz ist möglich, da sowohl die Lehmsteine der Mischung S2 als auch der Mischung S8 die Prüfungen zur Einstufung in die Anwendungsklasse für vollständig witterungsgeschützte Bauteile AK II erfüllen. Der Lehmstein der Mischung S2 entspricht mit ausreichend Reserve der Druckfestigkeitsklasse 2.

Der erhebliche Festigkeitsunterschied der Mischungen S2 und S8 lässt sich anhand der Mischungsverhältnisse und rheologischen Eigenschaften bei der Verarbeitung nicht erklären. Vielmehr scheint es unter Beimischung des „Karbonatisierten Betonsandes" die gleichen chemischen Wechselwirkungen und damit Festigkeitseinbußen zu geben, wie dies bei den Putzmischungen beobachtet wurde. Dies sollte eigentlich durch die Karbonatisierung des Betonsandes ausgeschlossen werden. Offensichtlich war diese bei dem bezogenen Produkt noch nicht abgeschlossen.

Brandverhalten

Die Einstufung des Brandverhaltens erfolgt bei rein mineralischen Produkten und Produkten mit organischem Anteil ≤ 1 M.- oder V.-Prozent (größerer Wert maßgebend) in die Baustoffklasse A1. Bei größeren organischen Anteilen wird von den Unterzeichnern keine A2- oder B1-Prüfung und Einstufung vorgenommen, sondern das Produkt in die Baustoffklasse B2 eingeordnet.

Da die Lehmsteinmischungen S2 und S8 ohne organische Zusatzmittel hergestellt wurden, konnten diese ohne weitere Prüfung in die Baustoffklasse A (nicht brennbar) eingeordnet werden.

Anwendungsklasse

Lehmsteine müssen entsprechend ihrem geplanten Einsatzgebiet den Anforderungen an die Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit entsprechen. Die entsprechenden Prüfungen sind in Abbildung 44 aufgelistet und die zugehörigen Prüfverfahren sind in DIN 18945 [8] beschrieben.

Tabelle 25: Prüfungen und Anforderungen zur Einstufung in die Anwendungsklassen AK Ia bis AK III

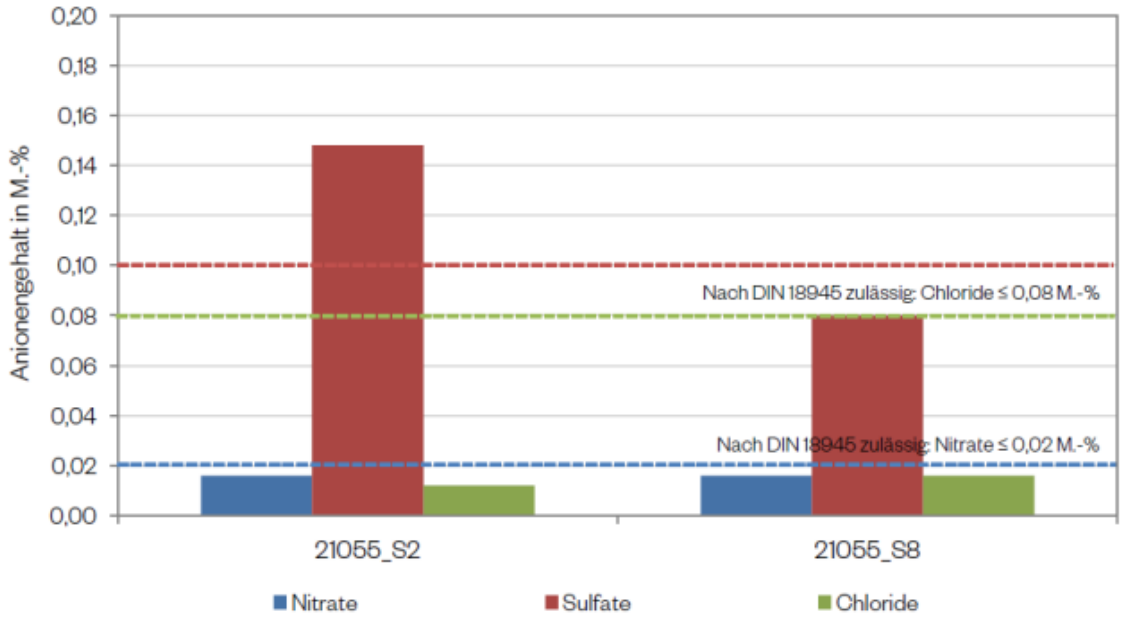
Anwendungsklasse	Tauchprüfung Masseverlust in %	Kontaktprüfung	Saugprüfung in h	Frostprüfung Zyklen
AK I a	≤ 5	Keine Risse oder Quellverformungen	≥ 24	≥ 15
AK I b	≤ 5	Keine Risse oder Quellverformungen	≥ 3	≥ 5
AK II	≤ 20	Keine Risse oder Quellverformungen	≥ 0,5	Keine Anforderung
AK III	Keine Anforderung	Keine Anforderung	Keine Anforderung	Keine Anforderung

Die Lehmsteine der Mischung S2 erfüllen die Prüfkriterien der Anwendungsklasse II und die Lehmsteine der Mischung S8 sogar die der Anwendungsklasse AK Ib. Jedoch sollte für eine spätere Produktion ebenfalls die AK II angestrebt werden, da diese für die meisten Anwendungsfälle ausreicht.

Zusammenfassend kann der Mischung S II eine höhere Festigkeit und der Mischung S8 eine höhere Feuchte- und Frostbeständigkeit bescheinigt werden.

Gehalt an bauschädlichen Salzen

Die Salzgehalte der Mischung S2 lag für die Sulfate oberhalb der Grenzwerte, die durch die DIN 18945 vorgegeben werden. Den Gehalt an bauschädlichen Salzen und deren Einordnung zeigt Abbildung 48.



Grafik: ZRS Ingenieure

Abbildung 49: Gehalt an bauschädlichen Salzen gemäß DIN 18945 und Messwerte der Mischungen S2 und S8

UAP 3.4 – Bau von Demonstratoren

Die Produkte, die von der Firma Claytec zur Verfügung gestellt wurden, wurden in kleinen Mockups zu Demonstratoren verarbeitet. Dabei konnte erstmals die Qualität der Baustoffe erprobt werden. Die Steine S2 und S8 lassen sich, wie für formgeschlagene Lehmsteine üblich, gut sägen. Auffällig beim Verarbeiten von M8 ist die unangenehme Textur des Mörtels. In der Mischung waren größere Klumpen (bis ca. 30 mm) vom Bindemittel. Nach Hinzugabe von Wasser ist der für den Betonsand typische unangenehme Geruch aufgefallen, der nach Trocknen der Proben wieder verflogen ist. Für das Mockup wurde die Mischung M8 als Lehmmauermörtel verwendet.

Foto: NBL

Abbildung 50: Klumpenbildung in Mischung M8

Foto: NBL

Abbildung 51: Anmischen des LPM M8

Foto: NBL

Abbildung 52: Mockup S8 und M8

Foto: NBL

Abbildung 53: Mockup Präsentation auf der Woche der Umwelt 2024

AP 4 – Lebenszyklusanalyse

Ziel des Arbeitspakets ist die Erstellung einer Ökobilanz, die ganzheitlich alle die für die Herstellung der Rezepturen notwendigen Prozesse gemäß DIN EN 15804 bilanziert. Als Benchmark dient die Materialherstellung einer vergleichbaren Rezeptur auf Basis von Primärrohstoffen. Unerwartete Verschlechterungen der Ökobilanz im Vergleich zu Lehmbaustoffen auf Basis von Primärrohstoffen können so identifiziert werden. Da nicht ausreichend Daten der Ersatzbaustoffe zur Verfügung gestellt werden konnten, kann keine vollständige EPD erstellt werden. Da sich die Rezepturen der fertigen Baustoffe stark ähneln und nur in der Rezeptur unterscheiden, wird vereinfacht der Fokus auf das Produkt Lehmputzmörtel gerichtet.

UAP 4.1 – Definition, Geltungsbereiche & Ziele

Ziel dieses Unterarbeitspaketes ist es, einen gemeinsamen Bewertungsrahmen für die Ökobilanz (LCA) zu entwickeln, der die Analysen in Bezug auf ihre methodischen Aspekte abdeckt und aufeinander abstimmt, um auf integrierte und konsistente Weise die ökologischen Auswirkungen der entwickelten RC Lehmbaustoffe gegenüber marktüblichen Produkten abbilden zu können. Im Folgenden wird daher eine genaue Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes inklusive der funktionellen Einheit, Methodik sowie Ziele festgelegt.

Geltungsbereich

Die funktionale Einheit wird über die jeweilige Baustoffnorm definiert. Für Lehmputzmörtel (LPM) ist dieses DIN 18947 und für Lehmsteine (LS) DIN 18945. Die Einheit für beide Baustoffe ist kg.

Lehmputzmörtel nach DIN 18947

Ein Lehmputzmörtel ist ein Mörtelprodukt zum Beschichten von Wänden und Decken auf Basis von Baulehmen, die mit feinkörnigen und/oder feinfaserigen Zuschlagstoffen abgemagert werden. Für das Anmischen wird Anmachwasser benötigt. Dessen Verdunstung führt zum Erhärten des Putzes. Dieser Prozess ist reversibel, da durch die Zugabe von Wasser der Lehmputzmörtel replastifiziert werden kann. Lehmputzmörtel können ein- oder mehrlagig aufgetragen werden. Es wird zwischen ungetrockneten, erdfeuchten und technisch getrockneten Lehmputzen unterschieden.

upMIN RC-Lehmputzmörtel

RC-Lehmputzmörtel, die im upMIN 100 Projekt entwickelt werden, unterscheiden sich im Vergleich zu Lehmputzmörteln nach DIN durch die Grundmaterialien. Es wurde angestrebt, sowohl die Zuschlagstoffe (Sand und Schluff) als auch das Bindemittel Ton, durch RC Baustoffe vollständig zu ersetzen. Im Projekt konnte das Bindemittel aufgrund bereits beschriebener Problemstellungen nicht substituiert werden. Es wurden zwei Lehmputzmörtel entwickelt. Bei der Mischung M2 wurde nur ein Teil des Zuschlags substituiert. Bei der Mischung M8 wurde der gesamte Zuschlag aus Rezyklaten gewonnen. Das Bindemittel in dieser Mischung wurde durch einen Lehm ersetzt, der ebenfalls aus dem Projekt stammt. Dabei handelt es sich jedoch nicht um ein aufbereitetes Rezyklat, sondern um gewöhnlichen Grubenlehm. Dieser würde allerdings normalerweise deponiert werden. Die Produkte werden mit einem erdfeuchten, rein mineralischen Putz verglichen.

Lehmsteine (LS) nach DIN 18945

Bei einem Lehmstein handelt es sich um ein ungebranntes, in der Regel quaderförmiges Lehmbauprodukt aus Lehmbaustoff, dessen alleiniges Bindemittel die Tonfraktion ist. Je nach Herstellungsverfahren, das einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften hat, werden die Steine unterteilt in formgeschlagene, formgepresste oder stranggepresste Lehmsteine. Als Zuschlagstoffe sind neben mineralischen Primärrohstoffen wie Sand und Schluff, organische Zuschlagstoffe sowie Ziegelsplitt aus mörtelfreien Ziegeln zugelassen.

upMIN RC-Lehmsteine

RC-Lehmsteinen, die im upMIN 100 Projekt entwickelt werden, unterscheiden sich im Vergleich zu Lehmsteinen nach DIN durch die Grundmaterialien. Bei den Mischungen der Steine wurde ebenfalls eine Substitution von Zuschlag und Bindemittel angestrebt, konnte jedoch ebenfalls nicht umgesetzt werden. Die Grundkonzeption der zwei Mischungen S2 und S8 ist wie bei M2 und M8 lediglich mit anderen Mischungsverhältnissen. Die Steine wurden formgeschlagen.

Anwendungsbereich

Lehmputzmörtel nach DIN 18947 können als ein- oder mehrlagige Beschichtung von Wänden und Decken im Innenbereich als Unter- oder Oberputz, aber auch im witterungsgeschützten Außenbereich als Unterputz für witterungsbeständige Oberputze eingesetzt werden. Die Auftragsstärken unterscheiden sich nach Anwendungsfall und liegen im Bereich von 5 – 20 mm. Lehmunterputze bilden die untere Lage eines mehrschichtigen Putzaufbaus. Der Lehmoberputz dient als Decklage, die gestrichen werden kann bzw. Untergrund für eine Lehmdünnlagenbeschichtung [51].

Lehmsteine nach DIN 18945, die im Werk hergestellt werden, sind trockene, quaderförmige Lehmbaustoffe, die vorzugsweise mit Lehmmauermörteln vermauert oder trocken gestapelt werden. Je nach Verwendungszweck und Beanspruchung müssen sie entsprechende Materialeigenschaften in Bezug auf ihr Feuchteverhalten aufweisen. Sie kommen überwiegend bei der Erstellung von Außen- und Innenwänden sowie für Ausfachungen von Außen- und Innenwänden zum Einsatz. Für die Anwendung von Lehmsteinen gelten die Lehmbauregeln [48]. Für die Anwendung in tragenden Wänden findet die neue DIN 18940 Anwendung, die seit Juni 2023 in Kraft getreten ist und die das tragende Bauen mit Lehmsteinen bis einschließlich Gebäudeklasse 4 zulässt. [52]

Systemgrenze

Als Systemgrenze wurden gemäß DIN 15804 die Prozess-/ Informationsmodule A1 – A3 festgelegt, die in der weiteren Ökobilanzierung betrachtet werden. Diese bilden ‚Von der Wiege bis zum Werkstor' den gesamten Herstellungsprozess ab. In diesen Modulen sind relevante Veränderungen im Vergleich zu Standard-Lehmbaustoffen zu erwarten, da die Rezyklate je nach Abbruchabfall einen mehr oder weniger aufwendigen Aufbereitungsprozess durchlaufen. Weitere Module, die nach DIN 15804 auch mit in die Bewertung einfließen könnten, (z. B. Betrachtung der Abfallbewirtschaftung (C3) sowie Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, bzw. Recyclingpotentiale (Modul D)) und die bei Lehmbaustoffen im Vergleich zu Nicht-Lehmbaustoffen bilanziert werden, werden explizit ausgeschlossen. Da in der Materialentwicklung eine uneingeschränkte Replasitifizierung, als eine der maßgeblichen Eigenschaften für Lehmbaustoffe, angestrebt wird, sind für diese Module keine relevanten Änderungen gegenüber marktüblichen Produkten zu erwarten. Tabelle 26 zeigt die in upMIN 100 zu bilanzierenden Module auf Basis in der DIN 15804 aufgeführten Module für die Ökobilanzierung. Im

Projekt werden innerhalb des Moduls A1 Anteile durch Rezyklate ersetzt. Für die Module A2 und A3 wird von der konventionellen Herstellung des Lehmbaustoffs ausgegangen.

Tabelle 26: Relevante Module für die Ökobilanzierung von upMIN 100 RC-Lehmbaustoffen nach DIN EN 15804 [22]

Herstellen			Errichtung		Nutzung					Entsorgung			G/L*
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	D
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau-/ Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau/ Erneuerung	Abbruch	Transport	Abfallbewirtschaftung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotential
					B6 Energieeinsatz für TGA								
					B7 Wassereinsatz für TGA								

* Gutschriften / Lasten

Referenz Nutzungsdauer

Die Referenznutzungsdauer (RSL – Reference Service Life) gibt für ein Bauprodukt die Nutzungsdauer an, die unter der Annahme normaler Nutzungsbedingungen zu erwarten ist. Der Bau-EPD Katalog der Bau-EDP GmbH in Österreich stellt im Rahmen des österreichischen Programmbetriebes für Umweltproduktdeklarationen (UPD) nach DIN 15804 Referenznutzungsdauern für unterschiedliche Baustoffe zur Verfügung, die als Orientierung für die festzulegende Nutzungsdauer in der Ökobilanz dienen können. Auch wenn die Ökobilanzierung keinen kompletten Produktzyklus ‚Cradle to Grave' oder ‚Cradle to Cradle' verfolgt, wird im Rahmen des upMIN 100 Projektes eine Nutzungsdauer festgelegt. Für die RC-Lehmbaustoffe muss diese im Rahmen der Materialentwicklung sinnvoll abgeschätzt werden. So soll eine Vergleichbarkeit der upMIN 100 zu den marktüblichen Lehmbauprodukten gewährleistet werden. Für am Markt verfügbare Lehmputzmörtel sowie Lehmsteine sind als Referenz Nutzungsdauern mit jeweils 100 Jahren definiert [53]. Diese wird für die Ökobilanzierung zu Grunde gelegt. Sollten die RC-Lehmbaustoffe über eine kürzere Nutzungsdauer verfügen, wird dies entsprechend in der Bilanzierung berücksichtigt.

Abschneidekriterien, Annahmen und Abschätzungen

Die Abschneidekriterien sind in der DIN 18945 sowie DIN 18947 definiert.

Für Lehmputzmörtel ist dort unter Abschnitt A.3.1.1 definiert, dass alle Masseanteile in % zu deklarieren sind. Beträgt die Berechnung des CO_2-Äquivalentswertes > 1 % der Gesamtmasse oder macht sie mehr als 1 % des Primärenergiebedarfs aus, werden sie entsprechend ihrem Masseanteil in der Berechnung berücksichtigt [10].

Für Lehmsteine ist dort unter Abschnitt A.2.1.1 definiert, dass alle Masseanteile in % zu deklarieren sind. Beträgt die Berechnung des CO_2-Äquivalentswertes > 1 % der Gesamtmasse oder macht sie mehr als > 1 % des Primärenergiebedarfs aus, werden sie entsprechend ihres Masseanteils in der Berechnung berücksichtigt [8].

Zusätzlich werden auch alle Stoffflüsse erfasst, die das System verlassen und deren Umweltwirkungen > 1 % ausmachen.

Alle Annahmen, die im Rahmen der Ökobilanzierung getroffen werden, basieren auf den Angaben der projektbeteiligten Partner feess als Produzent der Rezyklate sowie den Daten der Ökobaudat für Lehmbaustoffe. Sollten gewisse Angaben die Herausgabe von vertraulichen Daten beinhalten, werden in einem solchen Fall sinnvolle Abschätzungen getroffen, die im Rahmen der Ökobilanzierung entsprechend kenntlich gemacht werden.

Methodik

Zur Bewertung der upMIN RC-Lehmbaustoffe wird die Methodik der vergleichenden Ökobilanzierung gewählt. Grundsätzlich dient die Ökobilanz zur Abschätzung der Umweltwirkungen, die mit der Bereitstellung eines Produkts entstehen. Um potenzielle Verschlechterungen oder auch Verbesserungen zu marktüblichen Lehmbaustoffen identifizieren zu können, wird der Vergleich zu standardisierten Produkten notwendig [54]. Als Referenzprodukt für den Lehmputzmörtel wird das Produkt „Lehmputz Mineral 20“ von der Firma Claytec herangezogen. Für dieses Produkt liegt eine UPD vor [55].

Ziele

Die massive Nachfrage nach mineralischen Ressourcen (90 %) und immer noch steigenden Abfallzahlen von mineralischen Abfällen (55 %) durch den Bausektor lassen das Thema der Kreislaufwirtschaft immer wichtiger werden. Die Aufbereitung der Rezyklate bedingt andere Prozesse als die, die bei der aktuellen Produktion von Lehmbaustoffen erforderlich sind. Hinzu kommen andere Transportwege, die u.U. länger ausfallen könnten. Auch könnten zusätzliche Prozesse, die bei der Herstellung der RC-Lehmbaustoffe notwendig werden, Umweltwirkungen oder Energiebedarfe mit sich bringen. Diese Prozesse müssen ganzheitlich bewertet werden, um ausschließen zu können, dass rezyklierte Baustoffe eine Verschlechterung der Ökobilanz mit sich bringen.

Mit der Ökobilanzierung sollen im Rahmen des Projektes die folgenden Fragen konkret beantwortet werden:

- Lässt sich durch die Substitution von Primärrohstoffen in Bezug auf Zusatzstoffe die Ökobilanz von Lehmbaustoffen verbessern?
- Lässt sich durch die Substitution von Primärrohstoffen in Bezug auf Bindemittel die Ökobilanz von Lehmbaustoffen verbessern?
- Erfordert die Aufbereitung der rezyklierten Bau- und Abbruchabfälle mehr graue Energie?
- Verschlechtert sich die Ökobilanz durch andere Faktoren in der Prozesskette, wie z. B. längere Transportwege?

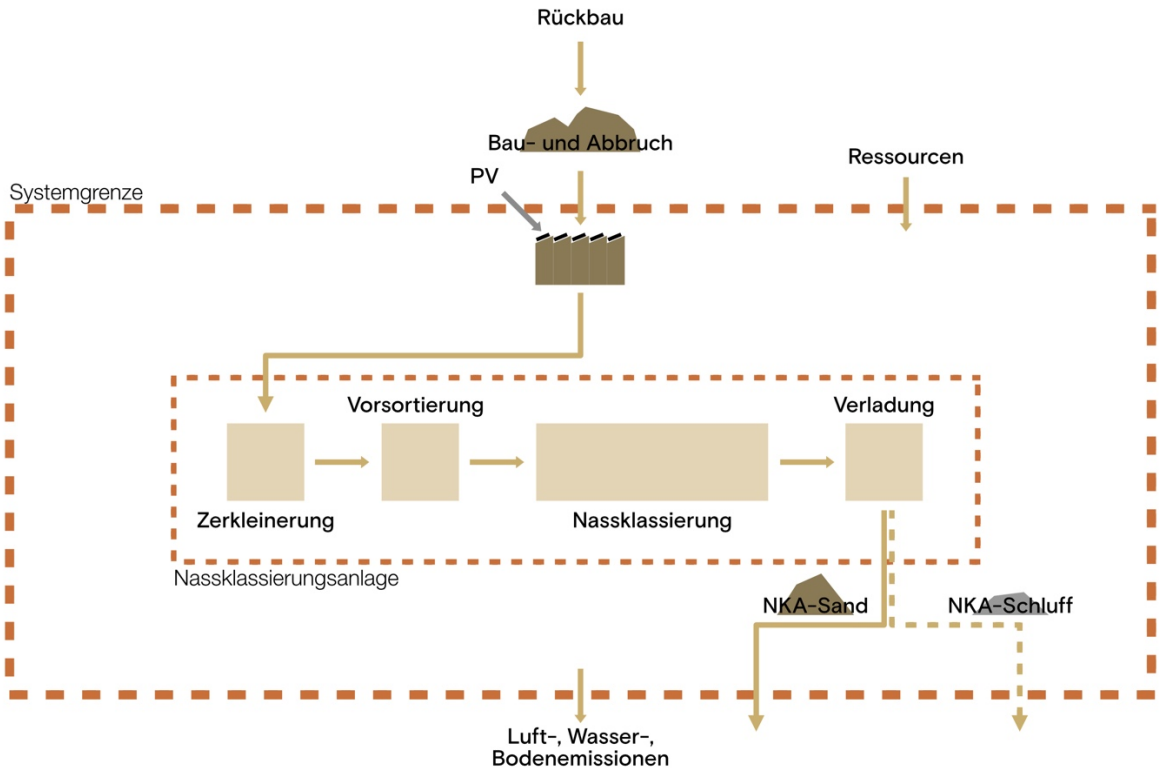
Diese Fragestellungen sind vor allem in Bezug auf eine ganzheitliche Bewertbarkeit des Vorhabens maßgeblich.

Im Rahmen des Projektes wird daher eine vergleichende Ökobilanzierung erstellt, die ganzheitlich alle die für die Herstellung der Rezepturen notwendigen Prozesse gemäß DIN EN 15804 bilanziert [22]. Für die Bilanzierung werden die Umweltbelastungen, der Ressourcenverbrauch, die Energieart und die Energiemenge für die Herstellung der entwickelten Lehmputze bzw. Lehmsteine auf Basis der Rezyklate

erfasst und bewertet. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit Lehmbaustoffen auf Basis von Primärrohstoffen können angestrebte Verbesserungen, aber auch unerwartete Verschlechterungen in der Gesamtbilanz quantifiziert werden.

UAP 4.2 – Eingaben in Bezug auf Prozesse

Die DIN EN 15804 regelt Umweltproduktdeklarationen für Bauwerke. Unter 6.2.2 sind Recyclingprozesse der Herstellungsphase A1 zuzuordnen [56]. Von der Firma feess konnte für diesen Bericht nur eine Gesamtzusammenstellung des Strombedarfs zur Verfügung gestellt werden. Die Prozesskette kann demnach nicht mit konkreten Zahlen belegt werden.



Grafik: NBL

Abbildung 54: Prozesskette Verarbeitung

UAP 4.3 – Inventar

Tabelle 27: Sachbilanz Lehmputzmörtel

Inputfaktoren	Claytec Mineral 20 (Erdfeucht)	LPM Muster-UPD (Erdfeucht)	LPM upMIN M2	LPM upMIN M8
Sekundärgrubenlehm	0,37* kg/kg	0,52 kg/kg	0,33 kg/kg	0,3 kg/kg
Gesteinskörnung 0/2	0,55* kg/kg	0,48 kg/kg	0,39 kg/kg	
Quarzsand 0/1	0,08 kg/kg			
Rezyklat Zuschlag			0,28 kg/kg (NKA)	0,7 kg/kg (NKA+Betonsand)

*Abschätzung aus EPD von Claytec

Für diesen Bericht konnten keine Hintergrund-Daten für Recycling Baustoffe gefunden werden, die vergleichbar mit den Prozessen der Firma feess sind. Demnach konnte keine Ökobilanz für die Recyclingbaustoffe erstellt werden. Methodisch würden die rezyklierten Gesteinskörnungen im Modul A1 einfließen, bzw. Anteile der gewöhnlichen Gesteinskörnung ersetzen. In Tabelle 27 ist die Sachbilanz unterschiedlicher Lehmputzmörtel zusammengefasst. Um Aussagen über verschiedene Wirkungsindikatoren treffen zu können, müssten entsprechende Daten für die Recyclingbaustoffe erhoben werden. In Tabelle 28 sind einige Wirkungsindikatoren dargestellt. Deutlich wird, dass die LPM der Firma Claytec und der allgemeine Datensatz der Muster UPD deutlich niedrigere Umweltauswirkungen im Vergleich zum Datensatz der Ökobaudat haben. Methodisch müssten die Anteile der Ausgangsstoffe in einem EPD-Editor für die LPM M2 und M8 nachmodelliert werden und entsprechend die Anteile des Sandes reduziert und um die Rezyklate ergänzt werden. Abschließend lässt sich die Arbeitshypothese des Forschungsprojekts, dass Lehmbaustoffe mit Rezyklatanteil einen „besseren" ökologischen Fußabdruck haben, nicht beweisen. Ergebnisse aus anderen Forschungsvorhaben weisen darauf hin, dass die Prozesse der Aufbereitung energieintensiver als die reine Entnahme sein können und demnach nicht von einer Verbesserung der Ökobilanz ausgegangen werden kann. Zumindest nicht bezogen auf alle Wirkungsindikatoren.

Tabelle 28: Ökobilanz Lehmputzmörtel für 1 kg

Indikator (A1-A3)	LPM Claytec Mineral 20 (Erdfeucht) [57]	Lehmputz Ökobaudat [58]	LPM Muster-UPD (Erdfeucht) [59]	LPM upMIN M2	LPM upMIN M8
GWP	0,0127 kgCO2eq.	0,1091 kgCO2eq.	0,00772 kg CO2eq.		
ODP	2,43E-04 kgCFC-11eq.	3,62E-13 kgCFC-11eq.	2,68E-10 kgCFC-11eq.		

AP	4,51E-06 $kgSO_2eq.$	2,07E-04 $kgSO_2eq.$	1,85E-05 $kgSO_2eq.$		
EP	1,61E-04 $kgPO_4^{3-}eq.$	9,46E-04 $kgPO_4^{3-}eq.$	3,66E-06 $kgPO_4^{3-}eq.$		
POCP	4,51E-06 $kgC_2H_4eq.$	1,98E-04 $kgC_2H_4eq.$	9,41E-06 $kgC_2H_4eq.$		
$PE_{ges.}$	0,58 MJ	1,24 MJ	0,0291 MJ		

GWP = Globales Treibhausgaspotenzial
ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht
AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser
EP = Eutrophierungspotenzial
POCP = Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon
$PE_{ges.}$ = Gesamter Primärenergiebedarf

Für diesen Bericht konnten nur grobe Daten über die Prozesse (gesamter Strombedarf) der Recyclingfirma zur Verfügung gestellt werden. Daher kann nur eine Vergleichsrechnung angestellt werden. Eine Forschungsarbeit vom KIT konnte im Jahr 2001 eine erste Bilanz für RC-Körnungen erarbeiten [60]. Dabei wurden über die Befragung von 11 verschiedenen Recycling-Unternehmen Energiewerte ermittelt, die vergleichbar mit der Angabe der Firma feess sind.

Indikator	Wert	Einheit	Material	LPM 03 Mineral 20 Erdfeucht	upMIN M2	%	upMIN M8	%
KRA	1	kg/kg	Lehm	0.3700000	0.3300000	-11	0.3000000	-19
(Kumulierter Rohstoffaufwand)	1.04	kg/kg	Sand	0.5720000	0.4056000	-38	0.0000000	-100
ohne Energie	1.082	kg/kg	Quarzsand	0.0865600				
Flächenverbrauch	0.000017	m2/kg	Lehm	0.0000063	0.0000056	-11	0.0000051	-19
	0.000203	m2/kg	Sand	0.0001117	0.0000792	-38	0.0000000	-100
	0.000211	m2/kg	Quarzsand	0.0000169				
KEA	0.038	MJ/kg	Lehm	0.0140600	0.0125400	-11	0.0114000	-19
(Kumulierter Energieaufwand)	0.036	MJ/kg	Sand	0.0198000	0.0140400	-67	0.0000000	-100
	0.287	MJ/kg	Quarzsand	0.0229600				
	0.018864	MJ/kg	Rezyklat von feess		0.0052819		0.0132048	
Summe Energie		MJ/kg		0.0568200	0.0318619	-44	0.0246048	-57

Quelle: Umweltbundesamt 01/2012: Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskusson

Grafik: NBL

Abbildung 55: Weitere Umweltindikatoren

UAP 4.4 – Bewertung und Interpretation

Laut einer Studie von 2004 am KIT führt die Substitution von rezyklierten Gesteinskörnungen nicht zu einer Verbesserung der Ökobilanz. [61] Die Studie beschäftigt sich mit der Substitution von Zuschlägen in Beton. Zum einen ist eine Nicht-Verbesserung der Ökobilanz auf einen erhöhten Bindemittel-Bedarf zurückzuführen und zum anderen sind die Verarbeitungsprozesse nicht so effizient wie die Entnahme der Rohstoffe. Für Lehmbaustoffe kann bisher noch nicht auf einen notwendigen höheren Bindemittelgehalt geschlossen werden, da die Mischungen je nach Produktart anders konzipiert sind. Darüber hinaus handelt es sich bei dem Bindemittel von Lehmbaustoffen um ein vergleichsweise emissionsarmes Produkt. Vor allem bei der Verwendung von erdfeuchtem Aushub als Bindemittel sind

keine energetisch aufwendigen Prozesse notwendig. Methodisch kann der Flächenverbrauch und der kumulierte Rohstoffaufwand aus der Bilanz der Baustoffe mit Rezyklat anteilig reduziert werden, da dieser durch den Einsatz von Rezyklaten nicht anfällt. Somit kann im Fall der Mischung M2 von einer Reduktion des Flächenverbrauchs von 38 % ausgegangen werden.

Um eine Aussage über die Umweltauswirkungen von Lehmbaustoffen mit enthaltenen Rezyklaten treffen zu können, müssten in einem weiteren Schritt Hintergrunddaten zu vergleichbaren Prozessen identifiziert werden, die als Grundlage für eine Berechnung dienen könnten. Alternativ müssten rezyklierte Gesteinskörnungen, die von Recycling-Unternehmen zur Verfügung gestellt werden, durch diese bewertet werden. Diese würde voraussetzen, dass das Unternehmen Datensätze zu ihren eigenen Produkten generieren würde.

AP 5 – Öffentlichkeitsarbeit & Vermarktung

Foto: NBL

Abbildung 56: Beitrag auf der BAU 2023 in München

Das Projekt wurde während des Berichtszeitraums auf verschiedensten Veranstaltungen vorgestellt und teilweise in Form von Kurzbeiträgen publiziert. Im Folgenden sind die wichtigsten Ereignisse aufgelistet.

Jahresausstellung TU Berlin

Das Projekt wurde bisher bei verschiedenen Veranstaltungen präsentiert. Am 23.07.2022 wurden die Ausgangsmaterialien und eine Kurzbeschreibung des Vorhabens im Rahmen der Jahresausstellung des Instituts für Architektur der TU Berlin ausgestellt. (https://www.youtube.com/watch?v=q8C6EZaxe_4)

sbe Konferenz TU Berlin

Die gleichen Inhalte wurden dann erneut im Rahmen der Sustainable Built Environment D-A-CH Conference 2022 (sbe22) vom 21.9.22-23.9.22 präsentiert (https://www.sbe22.berlin/)

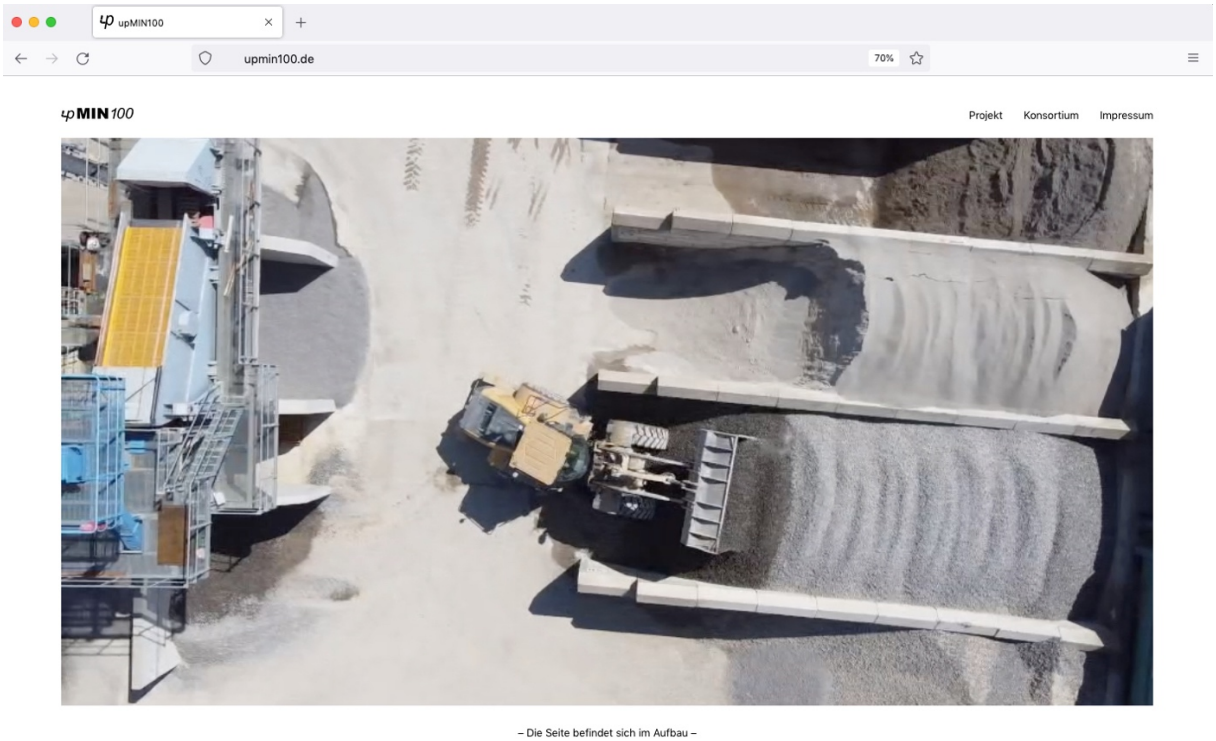
Symposium Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe FH Potsdam

Am 26.8.22 fand ein Symposium zum Thema Baustoffrecycling und Lehmbaustoffe an der FH Potsdam statt. Dort wurden Ergebnisse des Forschungsprojekts „Muster DPU Lehm 2.0“ veröffentlicht. Das Projekt wurde von der DBU gefördert. Die Veranstaltung diente dem Projekt upMIN100 zum Austausch über den aktuellen Stand der Forschung.

Foto: Felix Zohlen

Abbildung 57: Symposium zum Thema Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe am 26.8.22 in der FH Potsdam

Projektwebsite



Grafik: NBL

Abbildung 58: Screenshot Website

Darüber hinaus wurde bereits eine Website für das Projekt erstellt (www.upmin100.de) auf welcher im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit aktuelle Stände veröffentlicht werden können. Über die Website wurden Teilergebnisse des Projekts dokumentiert und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Zusätzlich gibt es zum Projekt Beiträge auf den Websites der Partner.

Betreuung Masterarbeit

Anhand der Ergebnisse des Projekts konnten Erkenntnisse in die Betreuung der Masterarbeit von Christian Gäth und Micha Kretschmann mit dem Titel „Gepresste Lehmsteine – Perspektiven für eine post-fossile Erde“ an der TU Berlin im Jahr 2023 einfließen.

Vortrag auf WASCON 2023 conference, Hongkong

Am 13.12.-16.12.2023 wurden Teilergebnisse des Projekts in einem Fachvortrag auf der WASCON 2023 conference in Hongkong von der BAM präsentiert.

Präsentation der Ergebnisse im Rahmen der BBSR Forschungstage

Die Zwischen- und Ergebnisse wurden bei den 25. Projektetage der Bauforschung vom BBSR am 5./6.12.2023 vorgestellt. Außerdem bei den 21. Projektetage am 20.09.2022.

Deutsches Architektenblatt

Am 16.01.2023 wurde das Projekt mit einem Artikel im Deutschen Architektenblatt beschrieben.

BAU 2023

Messestand auf der BAU Messe in München vom 17.04.2023-22.04.2023.

Grafik: NBL

Abbildung 59: Messestand

Vortrag auf Veranstaltung NBL FIVE

Vortrag im Rahmen der Veranstaltung NBL 5 an der TU Berlin am 08.06.2023 (https://www.nbl.berlin/events/nbl-five/).

Grafik: NBL

Abbildung 60: Vortrag auf der Veranstaltung NBL FIVE

Vortrag auf SwissBau

Fachvortrag auf der SwissBau 2024 vom 17.01.2024 in Basel.

LEHM 2024

Das Projekt wurde für einen Vortrag auf der LEHM 2024 – 9. Internationalen Fachtagung für Lehmbau in Weimar ausgewählt. Die Tagung findet in der Zeit vom 27. bis 29.9.2024 statt. Im Rahmen der Veranstaltung werden die Ergebnisse aus dem Projekt präsentiert.

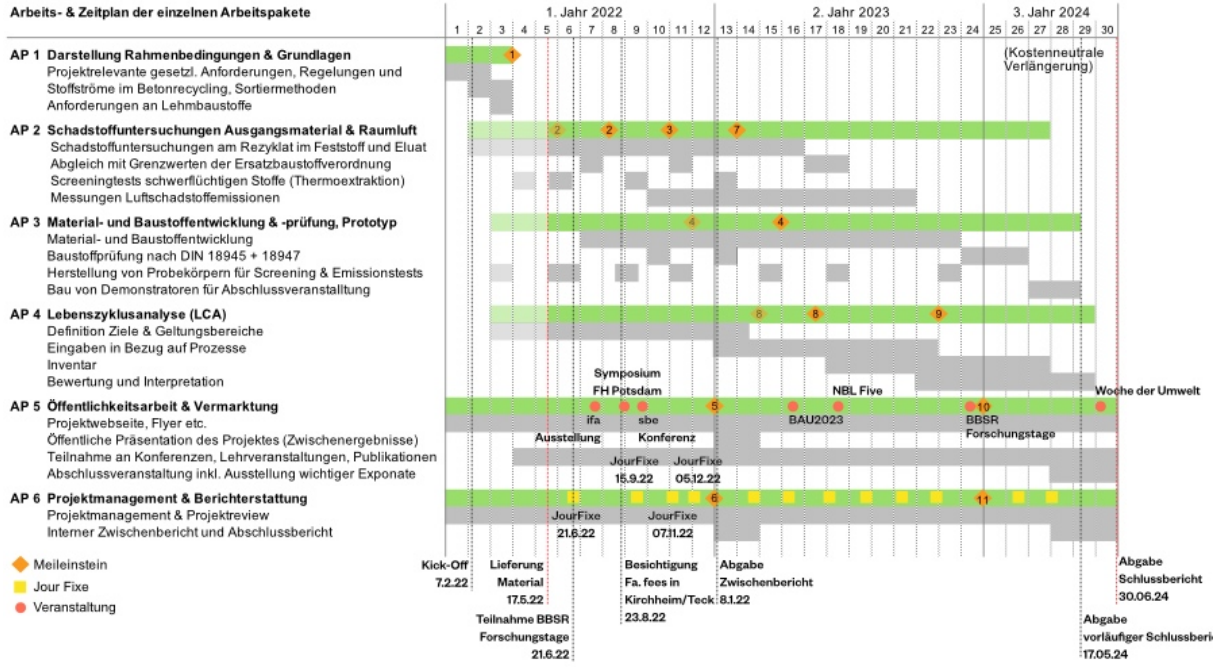
DBU Woche der Umwelt

Auf der Woche der Umwelt am 4. und 5.6.2024 wurde das Projekt im Rahmen des BMWSB Standes präsentiert.

AP 6 – Projektmanagement & Berichterstattung

Das Projekt konnte mit einem gemeinsamen Kick-Off Termin am 7.2.22, der hybrid organisiert war, starten. Dabei war der Fördermittelgeber online durch Herrn Wöffen vertreten. Die beteiligten Partner haben sich und ihre Institutionen vorgestellt. Im Anschluss wurden die jeweiligen Arbeitspakete erläutert. Bei der Lieferung des Materials kam es krankheitsbedingt zu Verzögerungen, weshalb sich der Arbeitsbeginn der Arbeitspakete 2, 3 und 4 verschoben hat. Es gab verschiedene Jour Fixe Termine, in denen die Zwischenergebnisse des Konsortiums diskutiert wurden. Das Projekt wurde im Rahmen verschiedener Veranstaltungen präsentiert. So auch bei den Forschungstagen des BBSR am 21.6.22. Am 23.8.22 fand ein Besichtigungstermin des Werksgeländes der Firma feess und Arbeitstermin in Kirchheim/Teck statt. Das Projekt wurde im Berichtszeitraum regelmäßig bei den Projektetagen der Bauforschung präsentiert. Einmal bei den 21. am 20./21.09.2022 und ein zweites Mal bei den 25. am 05./06.12.2023. Weitere Veranstaltungen sind in AP 5 aufgeführt.

Zum Ende von 2023 wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und genehmigt. Damit wurde das Projekt bis zum 30.06.2024 verlängert. Grund dafür waren Verzögerungen in der Baustoffentwicklung. Für den nächsten Förderaufruf für 2025 ist eine zweite Projektstufe geplant, die zum 31.05.2024 als Skizze eingereicht wird.



Grafik: NBL

Abbildung 61: Angepasster Projektzeitplan

Zusammenfassung Ergebnisse

Bewertung/Diskussion/Zielerreichung

Ausgehend von den Untersuchungen des Schadstoffübergangs in die Luft sind keine Belastungen für die Raumnutzer*innen, die mit den hier betrachteten Recyclingmaterialien versetzte Baumaterialien im Innenraum anwenden, zu erwarten. Es ist ferner zu beachten, dass sie als Ersatzmaterial für die Gesteinskörnung in einem Lehmbaustoff angewandt werden und sich somit ihr Anteil am Endprodukt reduziert. Normgerechte Emissionsprüfungen in größeren Prüfkammern mit den fertigen Produkten konnten die vorläufigen Ergebnisse bestätigen.

Gleiches gilt für die Schadstoffuntersuchungen im Feststoff und Eluat. Betrachtet man das strenge Worst-Case-Szenario der Anwendung der Grenzwerte nach EBV/BBodSchV wären folgende Bewertungen abzuleiten: Der Betonsand (1.1) weist für PAK und Schwermetalle erhöhte Eluat- und Feststoffwerte (nach BBodSchV und EBV) kann jedoch in reduzierter Menge theoretisch verwendet werden. Bei anderen Materialien (z. B. NKA-Schluff 2.1) sind die Feststoffwerte auffällig, jedoch die Eluatwerte eingehalten. In diesen Fällen wäre eine Verwertung vertretbar. PAK-Befunde besonders beim Baustoffsand (1.3) decken sich mit den Ergebnissen der Emissionsuntersuchungen. Für dieses Material liegen auch Überschreitungen der tolerierbaren Schwermetallfreisetzungen vor, so dass eine Verwertung nicht empfohlen werden kann. Beim naturbelassenen Filderlehm (2.3) liegen offensichtlich geogen bedingt erhöhte Werte für Arsen und Chrom vor, die Eluatwerte werden aber eingehalten und daher wäre eine Verwertung des Materials möglich.

Im Hinblick auf Schadstoffe und die Verwertung in technischen Bauwerken nach Ersatzbaustoffverordnung (EBV) wären der NKA-Sand (1.2) und der NKA-Schluff aus Boden (2.1) uneingeschränkt verwertbar. Es stellte sich heraus, dass sich die bei der Nasswäsche der Rezyklatkörnung eingesetzten Flockungsmittel negativ auf die Bindekraft des Lehms und damit auf dessen Verwendbarkeit auswirkt, weshalb die Probe 2.1 nicht verwendet wurde.

Die zuletzt untersuchte Probenserie (steinfreier Boden ohne Kalk (2.4), Betonsand 0,25/2 mm (1.1a), verschiedene Fraktionen Bodenaushub (4.1a,b,c) sind bezüglich der Schadstoffe nach den Feststoffuntersuchungen für eine Verwertung geeignet (nur teilweise leichte Überschreitungen der strengen Grenzwerte nach EBV/BBodSchV). Die Probe Bodenaushub <0,25 mm (4.1a) wurde zur Überprüfung der Hypothese der Schadstoff-Aufkonzentration im Feinanteil erzeugt und ist für eine weitere Verwendung nicht vorgesehen, da hierfür eine Siebung notwendig wäre, die nicht industriell abbildbar ist.

Sowohl der rezyklierte Betonsand als auch der sogenannte Karbonatisierte Betonsand wiesen chemische Wechselwirkungen zu den Tonmineralen auf, die die Festigkeit der hergestellten Lehmproben negativ beeinflussten. Offensichtlich war der Karbonatisierungsprozess bei dem sogenannten Karbonatisierten Betonsand nicht abgeschlossen. Dies wird zusätzlich über einen hohen PH-Wert der Proben bestätigt.

Bereits anhand der Zwischenergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen konnten Empfehlungen an den Normausschuss Lehmbau gegeben werden, der parallel zum Projekt die Überarbeitung der Lehmbau Normenreihe durchführte. Die Empfehlungen wurden vom Normenausschuss in alle Lehmbaustoffnormen übernommen und im März 2024 veröffentlicht. Demnach ist Rezyklat Körnung grundsätzlich zulässig, wenn bestimmte Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden. Die Grenzwerte werden durch die Klasse BM-0 definiert; einer besonders strengen Klasse, die den möglichen Einbau in Böden von Trinkwasserschutzgebieten inkludiert. Dies entspricht dem hohen ökologischen Anspruch der Bauherren, die Lehmbaustoffe einsetzen möchten.

Aus Herstellersicht wird auf der Seite des Bindemittels (Baulehm) in absehbarer Zeit kein Substitutionsbedarf gesehen. Geeigneter Baulehm steht beim Abbau anderer mineralischer Rohstoffe

wie Ton, Sand oder Kies in großen Quantitäten an, gleiches gilt für den Baugruben-Aushub großer Baumaßnahmen. Baulehm wird heute in großem Umfang deponiert, erhöht also das Abfallaufkommen. Auf der Seite des Zusatzstoffs (Sand) werden grundsätzlich Alternativen als sinnvoll erachtet. Sand und Kies sind begrenzt verfügbare wertvolle Rohstoffe, deren Abbau erhebliche Auswirkungen auf die Natur und Landschaft hat.

Preislich würden sich Rezyklatzumischungen im Rahmen der nach DIN 18947 zulässigen Anteile (max. 10 %) kaum auswirken. In rein mineralischen Mörtelprodukten würden sie aufgrund ihrer Bruchkornbeschaffenheit die Festigkeit verbessern können. Große Beimischungen könnten die Verarbeitbarkeit („Geschmeidigkeit") der Mörtel negativ beeinflussen. Dies bezieht sich auf die Verwendung von Körnungen aus Bruchprozessen, wie z.B. dem Betonsand.

Unter Marketingaspekten kann der Einsatz umweltfreundlicher Ersatzstoffe positives Echo finden. Dementgegen könnte Misstrauen bezüglich der Reinheit der Produkte entstehen, was bei einer hochsensiblen Naturbaustoffkundschaft nicht auszuschließen ist.

Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass eine Substitution der Zuschlagstoffe vollständig möglich ist. Die mechanisch optimierten Mischungen des Lehmputzmörtels „M2" und des Lehmsteins „S2" lassen sich dabei mit einer Substitutionsrate von 28 % in die Festigkeitsklasse S II für den Mörtel mit 1,99 N/mm^2 und in die Druckfestigkeitsklasse 2 für den Stein mit 3,4 N/mm^2 einordnen. Die Mischungen „M8" und „S8" hatten den Anspruch unter Berücksichtigung der Einhaltung aller Grenzwerte zu 100 % aus Materialien aus dem Projekt erzeugt zu werden. Da das Bindemittel (Filderlehm) als herkömmlicher Grubenlehm einzuordnen ist, konnte bei der Mischung „M8" eine Substitution von 70 % und bei „S8" von 50 % erreicht werden. Dabei ist „M8" mit einer Druckfestigkeit von 1,08 N/mm2 in die Festigkeitsklasse S I einzuordnen. „S8" erreicht mit einer Druckfestigkeit von 2,4 N/mm2 nicht die Druckfestigkeitsklasse 2 und ist damit nur für nicht tragendes Mauerwerk verwendbar.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren (Alphabetisch sortiert)

Dr. Horn, Wolfgang (BAM)

Dr. Kalbe, Ute (BAM)

Prof. Dipl.-Ing., Architektin BDA, Klinge, Andrea (HU)

M.Sc., Architekt, Mönig, Julian (NBL)

Dr.-Ing. Richter, Matthias (BAM)

Prof. Dipl.-Ing. Architekt BDA, Roswag-Klinge, Eike (NBL)

Dipl.-Ing., Architekt Röhlen, Ulrich (CLAY)

Prof. Dr.-Ing. Ziegert, Christof (ZRSI)

Weitere Mitwirkende

Dipl.-Geol. Eberhard, Fritz (feess)

M.Sc. Rauscher, Sebastian (feess)

Coesfeld, Bianca (BAM)

Hohmann, Gloria (ZRSI)

Hartmann, Iris (Claytec)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.24

Projektlaufzeit: 01.2022 bis 12.2023

Kostenneutrale Verlängerung: bis 06.2024

Fachliche Betreuung

Wöffen, Daniel

Referat WB 3

Kurzbiographien

Dr., Wolfgang Horn

Senior Researcher bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Prof. Dipl.-Ing., Architektin BDA, Andrea Klinge

Professur Konstruieren und Entwerfen (KIT), Forschungsschwerpunkt: kreislaufgerechtes Bauen, Projektleitung Forschung RE4, Baustoffentwicklung auf Basis mineralischer Bau- und Abbruchabfälle, Mitglied Prüfgremium EPD's Lehmbaustoffe. Teil der Geschäftsleitung ZRS Architekten

Dr., Ute Kalbe

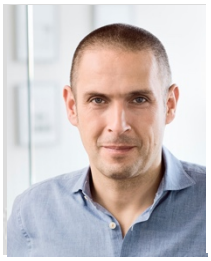
seit 1997 BAM FB 4.3, Forschungsschwerpunkte: Transport organischer Schadstoffe in Deponiebasisabdichtungen inkl. Langzeitstabilität, Bewertung Bodenkontaminationen hinsichtlich Pfad Boden- Grundwasser, Untersuchung Elutionsverhalten von Böden, Abfallmaterialien, Bauprodukten inkl. Ersatzbaustoffe, Mitglied diverser Gremien (u.a. DIBt,DIN, CEN, ISO) Bodenuntersuchungen BMU.

M.Sc., Architekt, Julian Mönig

Wissenschaftlicher Mitarbeiter NBL TU Berlin, Forschungsschwerpunkt: Lehmbaustoffe und kreislaufgerechtes Bauen, Projektmitarbeit DBU Forschungsprojekt Holz Ziegel Lehm

Dr.-Ing., Matthias Richter

Dipl.-Ing. Technischer Umweltschutz. Seit 2007 FB „Materialien u. Luftschadstoffe" an der BAM. Forschungsschwerpunkte: Untersuchung von Materialemissionen in die Innenraumluft, Materialverhalten bei Schadgasexposition, Fokus auf flüchtige organische Verbindungen. Mitglied in Normungsgremien bei DIN und CEN.



Prof., Dipl.-Ing. Architekt BDA, Eike Roswag-Klinge

Fachgebietsleiter NBL TU Berlin, Geschäftsführer ZRS Architekten, Forschungsschwerpunkt: klima- und kulturadaptive Architektur- und Low-Tech-Gebäudekonzepte, Mitarbeit u.a. EU Forschung RE4.

Dipl.-Ing. (FH), Architekt, Ulrich Röhlen

Verantwortlich für Technik, Marketing und Vertrieb verantwortlich bei der Fa. Claytec. Vorstandsmitglied im Dachverband Lehm e. V., stellvertretender Obmann des Normenausschusses „Lehmbau“ bei DIN und zurzeit Mitglied des Normenausschusses „Putzmörtel“. Mitverfasser der „Lehmbau Regeln“ und Mitverfasser des Fachbuchs „Lehmbau Praxis“.

Prof., Dr.-Ing., Christof Ziegert

Bauingenieur, Geschäftsführer ZRS Ingenieure GmbH, Obmann Normenausschuss Lehmbau am DIN, Vorstand Dachverband Lehm e.V., Stellvertretender Obmann PÜZ-Ausschuss Lehmbau.

Literaturverzeichnis

[1] [Online]. Available: https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/. [Zugriff am 20 6 20].

[2] [Online]. Available: Quelle: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/_publikationen-innen-statistischer-bericht.html. [Zugriff am 20 6 20].

[3] *13. Monitoring -Bericht Kreislaufwirtschaft Bau*, https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf.

[4] *Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)*, https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/.

[5] *DIN EN 206:2021-06 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021*.

[6] *DIN 1045-2, 2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*.

[7] [Online]. Available: https://www.abbruch-mv.de/2017/11/28/so-geht-es-mit-der-mantelverordnung-weiter-bauschutt-deponien-am-limit/. [Zugriff am 20 6 20].

[8] *DIN 18945, 2024-03. Lehmsteine - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.

[9] *DIN 18946, 2024-03. Lehmmauermörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.

[10] *DIN 18947, 2024-03. Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.

[11] *DIN 18948, 2024-03. Lehmplatten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.

[12] *DIN EN 12620, 2008. Gesteinskörnungen für Beton*.

[13] *DIN EN 13055-1, 2002. Leichte Gesteinskörnungen - Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel*.

[14] [Online]. Available: https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen.

[15] *DIN 19528:2009-01 Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur Gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von Organischen und Anorganischen Stoffen für Materialen mit einer Korngröße bis 32 mm -," Grundlegende Charakterisierung mit einem Ausf*.

[16] *CEN/TS 16637-3: 2016-06 Construction Products—Assessment of Release of Dangerous Substances—Part 3: Horizontal up-Flow Percolation Test*.

[17] *DIN 19529:2015-12 Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg*.

[18] *DIN EN 12457-4 (2003-01) Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem," Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für*.

[19] *DIBt (MV V TB, Tabelle A-2, Anhang A) Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB),"*, https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/MVVTB_2020-1.pdf.

[20] *DIBt Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MV V TB) Anhang 8 (ABG).*

[21] [Online]. Available: https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/ressourcenverbrauch-im-bauwesen/. [Zugriff am 9 1 2023].

[22] *DIN EN 15804, 2020. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.*

[23] *Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehmbau Regeln., Wiesbaden: Vieweg Teubner, 3. Auflage, 2008.*

[24] *A. e. a. (. Klinge, „Earthen materials as opportunity for CDW reduction. Results from the EU funded research project RE4, in Venkat Reddy et al (Hrsg.), Earthen Dwellings and Structures„" ISBN 978-981-13-5883-8. Bangalore: SPRINGER, S. 163 – 174.*

[25] *https://www.baucycle.de/content/dam/iml/baucycle/de/documents/BauCycle%20Informationsflyer.pdf.*

[26] *https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/tipps/forschung/baucycle-projekt-fuer-baustoffrecycling-4978288.*

[27] *DIN EN 13657: 2003-1, Charakterisierung von Abfällen - Aufschluß zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen.*

[28] *DIN EN ISO 11885 (2009-09), Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES).*

[29] *DIN EN ISO 17294-2: 2017-01, Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope.*

[30] *DIN EN 16181: 2019-08, Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mittels Gaschromatographie (GC) und Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC).*

[31] *DIN EN 16637-3: 2021-03, Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 3: Horizontale Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom.*

[32] *DIN 38407-39: 2011-09, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 39: Bestimmung ausgewählter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) - Verfahren mittels Gas.*

[33] *prEN 16516, 2015. Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft.*

[34] *DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.*

[35] *DIN 4226-101, 2002. Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN 12620-Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen.*

[36] [Online]. Available: https://www.zi-online.info/de/artikel/zi_Entwicklungen_zum_Recycling_von_Ziegeln_und_Ziegel-_mauerwerk_Teil_2__3534169.html.

[37] [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/neues-agbb-schema-zur-bewertung-von-bauprodukten.

[38] [Online]. Available: https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20198-201901-de%20Kriterien-V3.pdfo.

[39] *Richtlinie 5010 Emissionsarme Bauprodukte Ausgabe: 2022-03, 14. März 2022.*

[40] [Online]. Available: https://www.holz-von-hier.eu/wp-content/uploads/2018/12/Der-Weg-zum-gesunden_- Bauprodukt_web-1.pdf

[41] [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/.

[42] [Online]. Available: https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-12.pdf.

[43] A. Müller, Baustoffrecycling, Entstehung - Aufbereitung - Verwertung,, Springer.

[44] [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv/.

[45] A. Müller, Baustoffrecycling, Entstehung - Aufbereitung - Verwertung, Springer, p. 186f..

[46] [Online]. Available: https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/projekte/rc-beton/transportbeton/.

[47] *Laschet, P., 2021: Substitution von Bausand durch Recyclingkörnung in Lehmputzmörteln. Bachelorarbeit an der FH Aachen. Unveröffentlicht.*

[48] *Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehmbau Regeln. 3. Auflage. Vieweg + Teubner. Wiesbaden 2009.*

[49] Röhlen, U., Ziegert, C.: Lehmbau-Praxis – Planung und Ausführung. 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Beuth-Verlag. Berlin 2020.

[50] *Laschet, P., 2021: Substitution von Bausand durch Recyclingkörnung in Lehmputzmörteln. Bachelorarbeit an der FH Aachen. Unveröffentlicht.*

[51] [Online]. Available: https://www.dachverband-lehm.de/lehmbau/lehmbaustoffe.

[52] *DIN 18940:2023-06 Tragendes Lehmsteinmauerwerk - Konstruktion, Bemessung und Ausführung.*

[53] [Online]. Available: https://www.bau-epd.at/fileadmin/user_upload/pkr_allgemein_sonst_doks/BAU-EPD-M-DOKUMENT-20-Referenznutzungsdauern-Stand-20150810-Deutsch.pdf.

[54] [Online]. Available: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekobilanz_din_norm_33926_1295.htm.

[55] [Online]. Available: https://claytec.de/wp-content/uploads/2024/02/UPD_LPM_CLAY2023006_PKRU5-DE_2024-02-20.pdf.

[56] D. E. 1584.

[57] [Online]. Available: https://claytec.de/wp-content/uploads/2024/02/UPD_LPM_CLAY2023006_PKRU5-DE_2024-02-20.pdf.

[58] [Online]. Available: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9eae2fed-dba0-4641-b1cc-fd2cc65f2016&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de.

[59] [Online]. Available: https://www.dachverband-lehm.de/wissen/lehm-upd-muster-umweltproduktdeklarationen.

[60] J. B. L. S. M. W. I. U. Jeske, *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – eine Ökobilanz,* S. 219-224, Jahrg. 36.

[61] U. Jeske, J. Buchgeister, L. Schebek und M. Weil, „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - eine Ökobilanz“, 2004. [Online]. Available: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/120059892. [Zugriff am 05 2024].

[62] [Online]. Available: https://www.nbau.org/2022/10/16/e-din-18940-zu-tragendem-lehmsteinmauerwerk/.

[63] D. E. I. 14025:2011-10.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rezyklierte Gesteinskörnungen 7
Abbildung 2: Abbruchbaustelle in Berlin 10
Abbildung 3: Jährliche Menge an Bau- und Abbruchabfällen 11
Abbildung 4: Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle in Mio. Tonnen in 2020 [3] 11
Abbildung 5: Abfallhierarchie gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) 12
Abbildung 6: Verwertung der Recycling-Baustoffe in 2020 in Mio. Tonnen 12
Abbildung 7: Ausgangsmaterialien 20
Abbildung 8: Organigramm 21
Abbildung 9: Detaillierter Arbeitsplan aus der Antragsphase 23
Abbildung 10: Nassklassierungsanlage der Firma feess in Kirchheim/Teck 25
Abbildung 11: Grenzwerte Feststoff 32
Abbildung 12: Grenzwerte Eluat 33
Abbildung 13: Grenzwerte PAK Eluat und Feststoff und bauschädliche Salze 33
Abbildung 14: Darstellung der Stoffströme 34
Abbildung 15: Darstellung der Einbauklassen nach Mitteilung 20 der LAGA 36
Abbildung 16: Anfall und Verbleib der Fraktion Bauschutt in Mio. t 36
Abbildung 17: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für Probe 2.3 44
Abbildung 18: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für die Mischung M2 44
Abbildung 19: Einstufung der Feinbodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung KA5 für die Mischung M8 44
Abbildung 20: Proben zur Analyse der bauschädlichen Salze 46
Abbildung 21: Säulenversuche nach DIN 19528 in einer automatischen Säulenversuchsanlage (ecoTech GmbH, Bonn) 47
Abbildung 22: Übersicht maximale Substitutionsraten 51
Abbildung 23: Beladene µ-CTE mit Materialproben: 2.3) naturbelassener Filderlehm, 2.1) NKA-Schluff aus Boden-Bauschuttgemisch, 2.2) NKA-Schluff aus Boden, 1.3) Baustoffsand 0/2, 1.2) NKA-Sand 0/2, 1.1) Betonsand 0/2 52
Abbildung 24: 270 l-Emissionsprüfkammer 55
Abbildung 25: Lehmputzprobe in der 270 l-Emissionsprüfkammer 56
Abbildung 26: Probenahme an der 270 l-Emissionsprüfkammer mit einem Tenax®-Rohr 56
Abbildung 27: Druckfestigkeitsprüfung im Lehmlabor 59
Abbildung 28: Putzträger und Probemischungen. 65
Abbildung 29: Aufgetragene Putzmischungen 65

Abbildung 30: Schadstoffgehalt Betonsand (1.1) 66
Abbildung 31: Schadstoffgehalt NKA-Sand (1.3) 67
Abbildung 32: Schadstoffgehalt Carbonatisierter Betonsand (1.5) 67
Abbildung 33: Schadstoffgehalt Filderlehm 68
Abbildung 34: Mischungen 69
Abbildung 35: Prismen LPM Mischung M2 69
Abbildung 36: Prototyp formgeschlagener Lehmstein S2 und S8 direkt nach Ausschalen 70
Abbildung 37: Rezepturen von Lehmputzmörtel und -Steinen 71
Abbildung 38: Ergebnisse der Schwindmaßprüfung M1 bis M8 mit zusätzlicher Kennzeichnung der Schwindmaß-Grenzwerte für Lehmmauermörtel. Die Grenze für Lehmputzmörtel beträgt maximal 2,0 % 72
Abbildung 39: Festigkeitsklassen von Lehmputzmörteln nach DIN 18947 72
Abbildung 40: Druckfestigkeitsprüfung M1 bis M8 mit eingetragenen Festigkeitsklassen SI und SII. 73
Abbildung 41: Biegezugfestigkeitsprüfung M1 bis M8 mit eingetragenen Festigkeitsklassen SI und SII. 73
Abbildung 42: Ergebnisse Wasserdampfadsorption 74
Abbildung 43: Lehmsteine 75
Abbildung 44: Durchgeführte Prüfungen 75
Abbildung 45: Rohdichte der hergestellten Lehmsteine 76
Abbildung 46: Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffussionswiderstandszahl der Lehmsteinmischungen 76
Abbildung 47: Druckfestigkeits-Test 77
Abbildung 48: Ergebnisse der Druckfestigkeit der Lehmsteinmischungen S2 und S8, eingeordnet mit den jeweiligen Klassengrenzen. 77
Abbildung 49: Gehalt an bauschädlichen Salzen gemäß DIN 18945 und Messwerte der Mischungen S2 und S8 79
Abbildung 50: Klumpenbildung in Mischung M8 80
Abbildung 51: Anmischen des LPM M8 81
Abbildung 52: Mockup S8 und M8 81
Abbildung 53: Mockup Präsentation auf der Woche der Umwelt 2024 82
Abbildung 54: Prozesskette Verarbeitung 87
Abbildung 55: Weitere Umweltindikatoren 89
Abbildung 56: Beitrag auf der BAU 2023 in München 91
Abbildung 57: Symposium zum Thema Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe am 26.8.22 in der FH Potsdam 92
Abbildung 58: Screenshot Website 92
Abbildung 59: Messestand 94

Abbildung 60: Vortrag auf der Veranstaltung NBL FIVE 95
Abbildung 61: Angepasster Projektzeitplan 96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Proben mit Kurzbezeichnungen 19

Tabelle 2: Arbeitspakete 22

Tabelle 3: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen [35] 26

Tabelle 4: Höchstwerte der zu bewertenden Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen [35] 27

Tabelle 5: Abfallschlüssel gem. Abfallverzeichnisverordnung 35

Tabelle 6: PAK-Gehalte der untersuchten Proben im Feststoff im Vergleich mit Grenzwerten, alle Werte in mg/kg TS 39

Tabelle 7: Elementgehalte der untersuchten Proben im Feststoff im Vergleich mit Grenzwerten, alle Werte in mg/kg TS 41

Tabelle 8: Bodenkundliche Parameter 42

Tabelle 9b: Bodenkundliche Parameter (DIN EN 13139 Gesteinskörnungen für Mörtel, ergänzt um 0,500 und 0,125 mm, * gefriergetrocknet) 43

Tabelle 10: Ergebnisse Salzanalyse 45

Tabelle 11: PAK-Konzentrationen im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten 48

Tabelle 12: Kationen-Konzentration im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten 49

Tabelle 13: Anionen-Konzentration im Eluat W/F 2 L/kg (Sch2 = Schütteleluat nach DIN 19529, SV2 = Säuleneluat nach DIN 19528) im Vergleich zu Grenzwerten 50

Tabelle 14: Ergebnisse der Screeningtests für Betonsand 0/2 (1.1) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden. 53

Tabelle 15: Ergebnisse der Screeningtests für NKA-Sand 0/2 (1.2) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden. 54

Tabelle 16: Ergebnisse der Screeningtests für Baustoffsand 0/2 (1.3) über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC- bzw. SVOC-Konzentrationen. Ab dem 8. Probenahmetag war die Kammertemperatur auf 60 °C erhöht worden. 54

Tabelle 17 Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „M2"- Lehmputzmörtel über einen Zeitraum von 7 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³ 57

Tabelle 18: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „M8"- Lehmputzmörtel über einen Zeitraum von 7 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³ 58

Tabelle 19: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „S2"- Lehmsteine über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³ 58

Tabelle 20: Ergebnisse der Prüfkammeruntersuchungen für „S8"- Lehmsteine über einen Zeitraum von 9 Tagen. Angegeben sind die an den entsprechenden Probenahmetagen gemessenen und über Toluoläquivalente bestimmten VOC-Konzentrationen. BG ~ 2 µg/m³ 58

Tabelle 21: Materialbereitstellung 1 60

Tabelle 22: Materialbereitstellung 2 61

Tabelle 23: Zusätzliche Materialien 62

Tabelle 24: Mischungsverhältnis in Gramm 64

Tabelle 25: Prüfungen und Anforderungen zur Einstufung in die Anwendungsklassen AK Ia bis AK III 78

Tabelle 26: Relevante Module für die Ökobilanzierung von upMIN 100 RC-Lehmbaustoffen nach DIN EN 15804 [22] 85

Tabelle 27: Sachbilanz Lehmputzmörtel 88

Tabelle 28: Ökobilanz Lehmputzmörtel für 1 kg 88

Abkürzungen

AgBB = Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten

AK = Anwendungsklasse

AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser

DIbT = Deutsches Institut für Bautechnik

EBV = Ersatzbaustoffverordnung

EOX = Extrahierbare organisch gebundene Halogene

EP = Eutrophierungspotenzial

GWP = Globales Treibhausgaspotenzial

KrGW = Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen

LAGA = Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

LPM = Lehmputzmörtel

LS = Lehmsteine

MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration

NIK = niedrigste interessierende Konzentration

ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht

PAK = Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

PCB = Polychlorierte Biphenyle

PEges. = Gesamter Primärenergiebedarf

POCP = Potenzial hinsichtlich der Bildung von troposphärischem Ozon

VOC = Flüchtige organische Verbindungen

Anlagen

- Prüfprotokolle Lehmsteine
- Prüfprotokolle Lehmputzmörtel
- Prüfprotokoll Bauschädliche Salze

ZRS Ingenieure GmbH

Prüfbericht

Erstprüfung von Lehmsteinen

gemäß DIN 18945:2024-03

Projekt:	upMIN100
Projekt-Nr.:	21055
Auftraggeber (AG):	Natural Building Lab (NBL) Technische Universität Berlin Straße des 17. Juni 135 10623 Berlin
Auftragnehmer (AN):	Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert ZRS Ingenieure GmbH Schlesische Straße 26, Aufgang A D-10997 Berlin Tel.: 030 / 398 00 95 0 Fax: 030 / 398 00 95 66 ziegert@zrs.berlin

Berlin, 3. Mai 2024

Dieser Bericht umfasst insgesamt 20 Seiten.

Inhaltsverzeichnis:

1	**Aufgabenstellung und Zielsetzung**	**3**
2	**Prüfungen**	**4**
2.1	Form, Lochung und Maße	4
2.2	Steinrohdichte	6
2.3	Druckfestigkeit	7
2.4	Brandverhalten / Baustoffklasse	9
2.5	Verhalten unter Feuchte- und Frosteinwirkung	10
2.6	Gehalt an bauschädlichen Salzen	14
3	**Zusammenfassung der Ergebnisse**	**16**
4	**Verzeichnisse**	**18**
4.1	Literatur	18
4.2	Tabellen	18
4.3	Abbildungen	19
5	**Formale Aspekte**	**20**
5.1	Urheberrecht	20
5.2	Umfang	20
Anhang 1: Ergebnisprotokolle		**1**

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhaben „upMIN100“ wünscht der Auftraggeber die Übernahme wesentlicher Leistungen bei der Erstprüfung von Lehmsteinen gemäß DIN 18945 “Lehmsteine - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren“. Bei den zu untersuchenden Lehmsteinen handelt es sich um die nachfolgend aufgeführten Produkte, die im Rahmen dieses Berichts mit der vorangestellten Abkürzung bezeichnet werden:

- 21055_S2 Lehmstein mit 28 % Rezyklatanteil
- 21055_S8 Lehmstein mit 100 % Rezyklatanteil

Die Rezeptur der genannten Lehmsteine ist für die Anforderungen der Anwendungsklasse II ausgelegt, es werden aber auch alle Prüfungen, die für Anwendungskalsse Ib notwendig sind, ausgeführt.

Die in diesem Prüfbericht dokumentierten Untersuchungen umfassen folgende Prüfleistungen:

Prüfung	21055_S2	21055_S8
Beschreibung und Überprüfung der Ausgangsstoffe	-	-
Form, Lochung und Maße	x	x
Steinrohdichte	x	x
Druckfestigkeit	x	x
Brandverhalten*	x	x
Verhalten unter Feuchteeinwirkung (AK Ib)	x	x
Gehalt an bauschädlichen Salzen	x	x

* Die Einstufung des Brandverhaltens erfolgt bei rein mineralischen Produkten und Produkten mit organischen Anteil ≤ 1 M.-oder V.-Prozent (größerer Wert maßgebend) in die Baustoffklasse A1. Bei größeren organischen Anteilen wird von den Unterzeichnern keine A2- oder B1-Prüfung und Einstufung vorgenommen, sondern das Produkt in die Baustoffklasse B2 eingeordnet.

Tabelle 1: Übersicht der beauftragten Prüfungen

Anhand der ermittelten Steinrohdichten erfolgt die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Lehmsteine. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Lehmsteine angegeben. Es soll keine Berechnung des CO_2-Äquivalentkennwertes erfolgen.

Die Baustoffprüfungen wurden im Labor der ZRS Ingenieure GmbH, Schlesische Straße 26, Aufgang A, 10997 Berlin, durchgeführt.

2 Prüfungen

Die Prüfungen wurden nach den Vorgaben der [DIN 18945]: „Lehmsteine - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren" durchgeführt und als Bewertungsmaßstab der Ergebnisse, die in der Norm vorgegebenen Anforderungen an Lehmsteine zugrundegelegt.

Sämtliche Prüfprotokolle mit Einzel- sowie Mittelwerten der Prüfungsergebnisse sowie Angabe des Prüfungsdatums sind enthalten in

Anhang 1.

2.1 Form, Lochung und Maße

2.1.1 Anforderungen

Die Anforderungen an den zulässigen Lochanteil unterscheiden sich je nach Anwendungsklasse (kurz: AK) und geplanter Verwendung (AK Ib und AK II auch tragend) der Lehmsteine und sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Anwendungsklasse Verwendung	zul. Lochanteil in %	Außenstege in mm	Innenstege in mm
AK I a nichttragend	ungelocht *	≥ 50	≥ 70
AK I a tragend	≤ 15	≥ 30	≥ 20
AK I b tragend und nichttragend	≤ 15	≥ 30	≥ 20
AK II tragend	≤ 15	≥ 20	≥ 20
AK II nichttragend	≤ 30	≥ 20	≥ 4
AK III nichttragend	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen

*außer zwei mittig angeordneten Grifflöchern mit einer Gesamtfläche ≤ 15 %

Tabelle 2: Zulässiger Lochanteil und Mindeststegdicke von Lehmsteinen

Die Maße der Lehmsteine müssen innerhalb der in [DIN 18945] angegebenen und in Tabelle 3 zusammengestellten Grenzen liegen und dürfen innerhalb einer Lieferung die ebenfalls definierte Maßspanne nicht überschreiten. Weichen Lehmsteine von einer quaderförmigen Gestalt ab, so ist dies vom Hersteller zu deklarieren.

	Angaben in mm			
Maße	Nennmaß	Mindestmaß	Höchstmaß	Maßspanne
Steinlänge l bzw. Steinbreite b	90	84	95	6
	115	108	120	7
	145	137	148	8
	175	166	178	9
	240	230	245	12
	300	290	308	14
	365	355	373	14
Steinhöhe h	52	48	54	4
	71	66	74	5
	113	107	118	6
	155	149	160	6
	175	169	180	6
	238	231	243	7

Tabelle 3: Maße von Lehmsteinen nach Tabelle 4 der [DIN 18945]

2.1.2 Prüfvorgang

Die Abmessungen der Lehmsteine sowie etwaiger Löcher und Stege, deren Art und Lage werden an je 6 Lehmsteinen mittels Messschieber geprüft. Anhand der ermittelten Abmessungen erfolgt die Zuordnung von Formatkurzzeichen nach Tabelle 5 der [DIN 18945].

2.1.3 Ergebnisse

Die beiden untersuchten Lehmsteinsorten weisen eine quaderförmige Gestalt auf, wobei bei der Steinsorte 21055_S2 Abweichungen zu erwähnen sind.
Grundsätzlich ist auch zu bemerken, dass der Zustand beider Lehmsteinsorten nach Herstellung tendenziell nicht ideal ist. Etliche der Steine sind relativ unsauber gearbeitet, vereinzelt weisen Lehmsteine Risse auf und mitunter gibt es unsauber ausgeformte Ecken, oder Löcher bzw. Hohlräume. Insbesondere bei der Sorte 21055_S2 fallen durchgängig nicht rechtwinklig zu den Lagerflächen stehenden Seitenflächen auf, was auf eine etwas zu feuchte Ausgangsmasse schließen lässt. Diesbezüglich sind gesonderte Deklarationshinweise erforderlich.

Die erfassten mittleren Abmessungen und Maßspannen sind zusammen mit der sich daraus ergebenden Formatkurzbezeichnung für die zwei untersuchten Lehmsteinsorten in Tabelle 4 dargestellt:

	Gemittelte Abmessungen / Maßspannen in mm*			Formatkurzzeichen
Probe	Länge	Breite	Höhe	

21055_S2	251 / 13	125 / 4	70 / 3	S
21055_S8	247 / 6	119 / 6	75 / 7	S

*Mittelwert aus 6 Lehmsteinen je Sorte und zweifacher Messung an jedem Lehmstein

Tabelle 4: Übersicht der ermittelten Abmessungen und der sich nach [DIN 18945] daraus ergebenden Formatkurzzeichen, Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte sind rot hervorgehoben

Beide Lehmsteinsorten sollten normalformatig sein. Bei 21055_S2 wurden die nach [DIN 18945] zulässigen Höchstwerte für die Länge und Breite von 245 und 120 mm im Mittel überschritten. Bei 21055_S8 wurden die nach [DIN 18945] zulässigen Höchstwerte für die Länge und Höhe von 245 und 74 mm im Mittel überschritten. Auch einige Maßspannen für Normalformate wurden nicht eingehalten, so dass beide Steinsorten als Sonderformate zu deklarieren sind. Die Lehmsteine sind als Vollsteine zu bezeichnen.

2.2 Steinrohdichte

2.2.1 Anforderungen

Da es sich bei beiden zu untersuchenden Lehmsteinsorten nach den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Kapitel 2.2.3 gemäß [DIN 18945] um Vollsteine handelt, wird die Steinrohdichte bestimmt, während bei Lochlehmsteinen die Stoffrohdichte zu ermitteln wäre. Für die Ermittlung der Steinrohdichte gelten die in [DIN 18945] definierten Anforderungen, wobei Lehmsteine anhand ihrer Steinrohdichte den Rohdichteklassen nach Tabelle 6 der Norm zugeordnet werden. Lehmsteine für tragendes Mauerwerk müssen mindestens der Rohdichteklasse 1,4 (1210 kg/m³) entsprechen.

2.2.2 Prüfvorgang

Für die Bestimmung der Steinrohdichten wurden sechs Lehmsteine je Sorte bei Ausgleichsfeuchte (23 °C/50 % relativer Luftfeuchte) bis zur Massekonstanz konditioniert und mit dem Messschieber vermessen, wobei sich die Steinrohdichte aus dem Verhältnis der Masse bezogen auf das äußere Volumen einschließlich etwaiger vorhandener Löcher ergibt. Aus den Einzelwerten wurde für jede Probenreihe ein Mittelwert gebildet, anhand dessen die Einstufung in die Rohdichteklasse von Lehmsteinen erfolgt.

2.2.3 Ergebnisse

Die ermittelten mittleren Steinrohdichten sind in nachfolgender Abbildung vergleichend gegenübergestellt und die für die Lehmsteine relevanten Rohdichteklassen kenntlich gemacht. Demnach ist die Lehmsteinsorte 21055_S2 mit einer mittleren Rohdichte von 1866 kg/m³ in die Rohdichteklasse 2,0 einzuordnen.

Die Rohdichte der Steinsorte 21055_S8 liegt bei 1752 kg/m³ Daraus ergibt sich eine Einstufung in Rohdichteklasse 1,8.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abbildung 1.

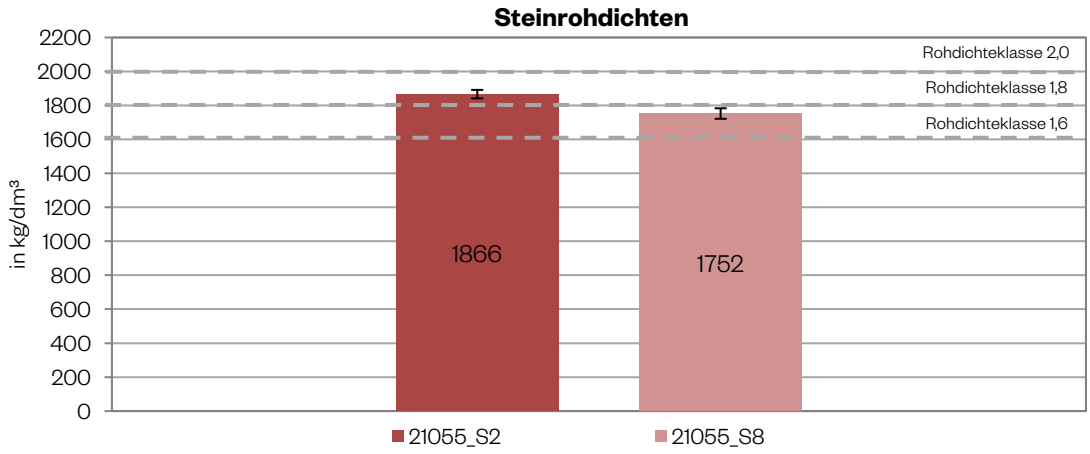


Abbildung 1: Übersicht der ermittelten mittleren Steinrohdichten inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten Klassengrenzen der maßgebenden Rohdichteklassen

Bei Vollsteinen entspricht die Steinrohdichte der Stoffrohdichte, so dass basierend auf den ermittelten Rohdichten, wie in der folgenden Tabelle 5 dargestellt, die Einstufung der Wärmeleitfähigkeit für die Lehmsteine nach [DIN 4108-4] erfolgt. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl kann unabhängig von der Rohdichte gemäß [DIN 18945] mit μ= 5/10 angenommen werden. Eine Prüfung des Wasserdampfdiffusionswiderstands nach [DIN EN ISO 12572] ist nicht erfolgt.

Eigenschaften	21055_S2	21055_S8
Stoffrohdichte in kg/m³	1866	1752
Wärmeleitfähigkeit λ in W/m·K	0,91	0,73
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	5/10	

Tabelle 5: Anhand der Steinrohdichten erfolgte Einstufung der Wärmeleitfähigkeiten und Angabe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

2.3 Druckfestigkeit

2.3.1 Anforderungen

Lehmsteine, die für tragendes Mauerwerk verwendend werden sollen, müssen nach [DIN 18945] der Druckfestigkeitsklasse 2 entsprechen, wobei die in folgender Tabelle angegebenen Mittelwerte und kleinsten Einzelwerte nicht unterschritten werden dürfen.

Druckfestigkeitsklasse	Druckfestigkeit in N/mm²	
	Mittelwert	kleinster Einzelwert
2	2,5	2,0
3	3,8	3,0
4	5,0	4,0
5	6,3	5,0
6	7,5	6,0

Tabelle 6: Druckfestigkeitsklassen von Lehmsteinen gemäß [DIN 18945]

Lehmsteine für nichttragendes Mauerwerk müssen für die Handhabung und vorgesehene Anwendung ausreichend fest sein, was bei einer Festigkeit von 1 N/mm² in der Regel gegeben ist. Eine Prüfung ist bei nichttragend eingesetzten Lehmsteinen nur im Zweifelsfall erforderlich.

2.3.2 Prüfvorgang

Für die Prüfung wurden die Lagerflächen der insgesamt sechs Probekörper mit Gipsmörtel abgeglichen und auf diese Weise für die Prüfung ebenflächige, planparallele Lagerflächen hergestellt.

Die präparierten Probekörper wurden anschließend bis zur Massekonstanz im Klimaschrank (Fabrikat - Vötsch VC3 0018) bei 23 °C /50 % relativer Luftfeuchte bis Erreichen der Ausgleichsfeuchte konditioniert.

Innerhalb einer Stunde nach Entnahme der Lehmsteine aus dem Klimaschrank erfolgte die Druckprüfung bis zum Bruch der Probekörper. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde an die Festigkeit der untersuchten Lehmsteine angepasst, sodass der Bruch innerhalb des in [DIN 18945] definierten Zeitintervalls von 30 s bis 90 s eintrat.

Die Druckfestigkeit f_{st} errechnete sich aus dem Verhältnis von Höchstlast und umschlossener Querschnittsfläche, multipliziert mit dem Formfaktor F nach [DIN 18945, Tabelle 9] für die jeweiligen Nennmaße der Lehmsteinhöhen. In diesem Fall ist der angewendete Formfaktor F = 0,8 bei einem Nennmaß von 52 ≤ h < 75 mm.

2.3.3 Ergebnisse

Die Druckfestigkeit der Lehmsteine 21055_S2 lag im Mittel bei 3,4 N/mm², wobei der kleinste Einzelwert 3,3 N/mm² betrug. Anhand dieser Werte ist diese Lehmsteinsorte der Druckfestigkeitsklasse 2 zuzuordnen. Die Anforderung der [DIN 18945] an tragend eingesetzte Lehmsteine wird damit (hinsichtlich der Druckfestigkeit) erfüllt.

		21055_S2	21055_S8
Druckfestigkeit	Kleinster Einzelwert in N/mm²	4,1	2,8
	Mittelwert in N/mm²	4,3	3,1

Druckfestigkeit multipliziert mit Formfaktor 0,8 bei Nennmaß 52 ≤ h < 75 mm in N/mm²	Kleinster Einzelwert in N/mm²	3,3	2,2
	Mittelwert in N/mm²	3,4	2,4

Tabelle 7: Übersicht der ermittelten Druckfestigkeitsergebnisse

Die Druckfestigkeit der Lehmsteine 21055_S8 lag im Mittel bei 2,4 N/mm², wobei der kleinste Einzelwert 2,2 N/mm² betrug. Anhand dieser Werte ist diese Lehmsteinsorte in keine der Druckfestigkeitsklassen zuzuordnen. Die Anforderung der [DIN 18945] an tragend eingesetzte Lehmsteine wird damit nicht erfüllt. Für nichttragendes Mauerwerk (ca. 1 N/mm²) sind diese Lehmsteine hingegen geeignet.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abbildung 2.

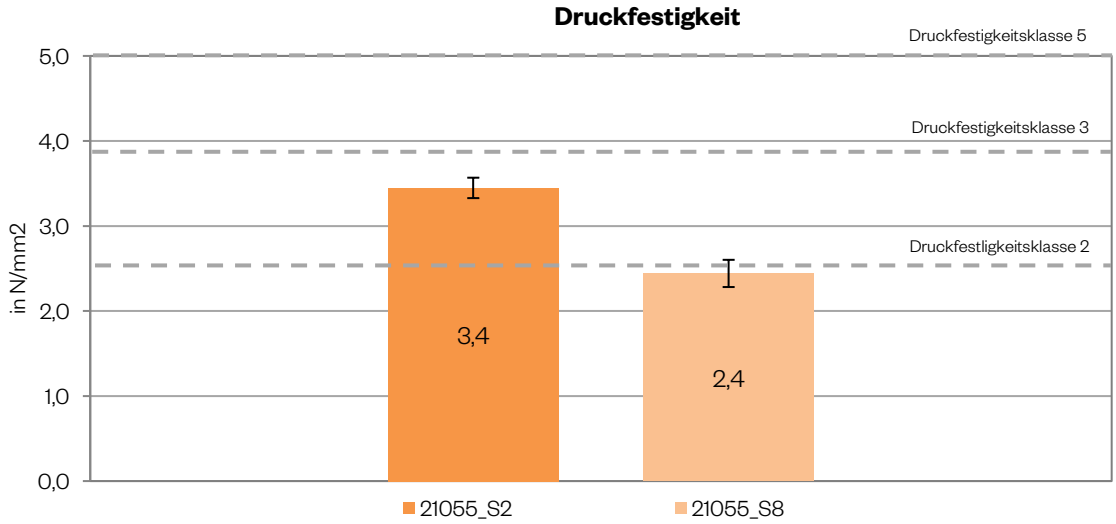


Abbildung 2: Übersicht der ermittelten mittleren Druckfestigkeiten inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten Klassengrenzen der maßgebenden Druckfestigkeitsklassen

2.4 Brandverhalten / Baustoffklasse

2.4.1 Anforderungen

Die Ermittlung des Brandverhaltens hat nach [DIN 18945] gemäß [DIN 4102-1] zu erfolgen. Lehmsteine ohne organische Zuschläge können nach [DIN 4102-4] in die Baustoffklasse A1 eingeordnet werden. Lehmsteine mit einem Gehalt von ≤ 1 % der Masse oder des Volumens an homogen verteilten organischen Stoffen können ebenfalls der Baustoffklasse A1 zugeordnet werden. Die für alle sonstigen Lehmsteine erforderlichen A2- oder B1-Prüfungen zur Bestimmung des Brandverhaltens erfolgen im Rahmen des Auftrags nicht, so dass für diese eine Einstufung in die Baustoffklasse B2 vorgenommen wird.

2.4.2 Prüfvorgang

Die Einstufung von rein mineralischen Lehmsteinen erfolgt ohne gesonderte Prüfung.

2.4.3 Ergebnisse

Die rein mineralischen Lehmsteine 21055_S2 und 21055_S8 können ohne Prüfung in die Baustoffklasse A1 (nichtbrennbar, ohne brennbare Baustoffe) eingeordnet werden.

2.5 Verhalten unter Feuchte- und Frosteinwirkung

An Lehmsteine werden abhängig von ihrer Anwendungsklasse unterschiedliche Anforderungen an ihre Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit gestellt. Das Verhalten unter Feuchteeinwirkung wird mit der nachfolgend beschriebenen Tauchprüfung, Kontaktprüfung und Saugprüfung untersucht. Bezüglich der Widerstandsfähigkeit gegen Frosteinwirkung sind von Lehmsteinen der Anwendungsklasse II und III keine Vorgaben einzuhalten. Lehmsteine für der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk müssen hingegen, bedingt durch die aus der Anwendung resultierenden Beanspruchungen, Frosteinwirkungen längerfristig schadensfrei standhalten. Die in [DIN 18945] definierten Anforderungen zur Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Anwendungsklasse	Tauchprüfung Masseverlust in %	Kontaktprüfung	Saugprüfung in h	Frostprüfung Zyklen
AK I a	≤ 5	keine Risse oder Quellverformungen	≥ 24	≥ 15
AK I b	≤ 5	keine Risse oder Quellverformungen	≥ 3	≥ 5
AK II	≤ 20	keine Risse oder Quellverformungen	≥ 0,5	Keine Anforderungen
AK III	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen

Tabelle 8: Anforderungen an die Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit gemäß [DIN 18945]

2.5.1 Tauchprüfung

2.5.1.1 Anforderungen

Es gelten in Abhängigkeit von der Anwendungsklasse die in [DIN 18945] aufgeführten und in Tabelle 8 zusammengestellten Anforderungen.

2.5.1.2 Prüfvorgang

Je Lehmsteinsorte sind 3 ganze Steine bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte bis zur Massekonstanz zu konditionieren und anschließend für 10 Minuten stirnseitig 10 cm tief in ein Wasserbecken zu tauchen. Der sich aus der Wassereinwirkung ergebende Masseverlust ist über das im Wasserbecken befindliche und folgend in einem Filter aufgefangene Material zu bestimmen. Das Filtrat ist zunächst bei 40 °C zu trocknen und anschließend bis zur

Massekonstanz bei Normklima (23 °C/50 % relativer Luftfeuchte) zu konditionieren. Der prozentuale Masseverlust ergibt sich aus dem Verhältnis der Masse des Filtrats zu der Ausgangsmasse der Lehmsteine.

2.5.1.3 Ergebnisse

Die sich infolge der Tauchprüfung ergebenden mittleren Masseverluste von 11 % für 21055_S2 und 5 % für 21055_S8 liegen unter dem für die AK II zulässigen Höchstwert von 15 % der Ausgangsmasse. Der Grenzwert für die AK Ia und AK Ib von 5% wird bei 21055_S2 deutlich überschritten. Die Steinsorte 21055_S8 hält diesen Grenzwert gerade noch ein und erfüllt damit die Anforderungen für die AK Ib. Die mittleren Masseverluste sind zusammen mit den Standardabweichungen in Abbildung 3 dargestellt.

Eine abschließende Einordnung der geprüften Lehmsteinsorten erfolgt unter Berücksichtigung der übrigen Untersuchungsergebnisse in den folgenden Kapiteln.

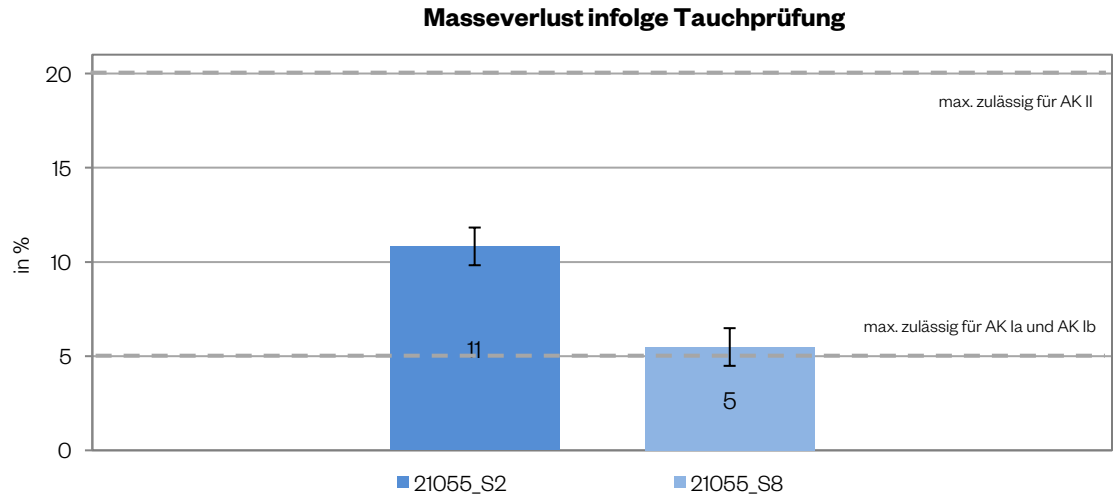


Abbildung 3: Übersicht der ermittelten mittleren Masseverluste infolge Tauchprüfung inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten maximal zulässigen Masseverluste der AK Ia und AK Ib sowie AK II

2.5.2 Kontaktprüfung

2.5.2.1 Anforderungen

Lehmsteine der Anwendungsklasse I und II dürfen nach erfolgter Kontaktprüfung keine Risse, insbesondere parallel zur feuchtebeaufschlagten Oberfläche oder bleibende Quellverformungen, aufweisen.

2.5.2.2 Prüfvorgang

In Vorbereitung der Prüfung sind 3 ganze Lehmsteine bei Normklima bis zur Massekonstanz zu konditionieren. Im Anschluss werden auf die lange schmale Seite der Lehmsteine Kompressen aufgelegt und bei AK II mit 0,5 g Wasser pro cm² Steinfläche, bei AK Ia und AK Ib mit 1,0 g Wasser pro cm² Steinfläche getränkt. Die so präparierten Lehmsteine werden für 24 Stunden über Wasser gelagert und nachfolgend erneut für 2 Tage bei Normklima (23 °C/50 % relativer Luftfeuchte) konditioniert. Abschließend wird die feuchtebeaufschlagte Fläche begutachtet.

2.5.2.3 Ergebnisse

Die Probekörper der Lehmsteinsorten 21055_S2 und _S8 wurden nach Anforderungen der AK Ib mit 1 g Wasser pro cm² beaufschlagt.
Die Steine 21055_S2 zeigten zum Beurteilungszeitpunkt keine bleibenden Quellverformungen, aber viele kleine Risse an den die Seitenflächen und Ecken, die systematisch parallel zur beaufschlagten Fläche verlaufen. Ein Bereich von 2-4 cm ist ringsum betroffen. Die Rissbildung stellt nach Art und Umfang ein Versagenskriterium gemäß [DIN 18945] dar. Die definierten Anforderungen an Lehmsteine der AK Ia, AK Ib und AK II werden demnach nicht erfüllt.

Die Steine 21055_S8 zeigten zum Beurteilungszeitpunkt keine bleibenden Quellverformungen sowie Risse und können anhand der Ergebnisse aus der Kontaktprüfung in die AK I eingestuft werden.

Eine abschließende Einordnung der geprüften Lehmsteinsorten erfolgt unter Berücksichtigung der übrigen Untersuchungsergebnisse in den folgenden Kapiteln.

2.5.3 Saugprüfung

2.5.3.1 Anforderungen

Es gelten die in [DIN 18945] für die verschiedenen Anwendungsklassen von Lehmsteinen definierten Anforderungen, die in Tabelle 8 aufgeführt sind.

2.5.3.2 Prüfvorgang

Für die Sauprüfung sind drei halbe Lehmsteine nach erfolgter Konditionierung bei Normklima bis zur Massekonstanz mit ihrer Lagerfläche auf Schwammtücher zu setzen, die wiederum auf kapillar leitfähigen Ziegelsteinen liegen. Die Ziegelsteine müssen von Wasser umgeben sein, wobei der Wasserspiegel während der gesamten Prüfung kurz unter der Oberfläche der Ziegel liegen sollte. Nach 30 Minuten, 3 Stunden und 24 Stunden ist der Zustand der Lehmsteine zu bewerten, wobei die Prüfung zu den jeweiligen Zeitpunkten als bestanden gilt, wenn die Ober- und Seitenflächen der Lehmsteine keine durch das Quellen hervorgerufenen Risse aufweisen. Verlaufen geringfügige Haarrisse parallel zur Lagerfläche, sind diese zulässig. Das Quellen selbst, ist kein Versagenskriterium.

2.5.3.3 Ergebnisse

Die Lehmsteinsorte 21055_S2 zeigte bereits nach 30 Minuten ringsum feinste, nicht mehr geringfügige, Risse parallel zur Lagerfläche und leichte Verformung in den unteren 1-1,5 cm ab Lagerfläche. Die Steine sind dort bereits sehr weich. Es sind zwar keine Risse an der Oberfläche aber einzelne senkrechte Risse an den Seitenflächen sowie eine feine systematische Rissstruktur über die Lagerecken. Die Lehmsteine erfüllen in diesem kritischen Zustand weder die Anforderungen von AK II noch von AK Ib.

Auch nach 3 Stunden zeigen die Steine der Sorte 21055_S8 keine maßgeblichen Risse oder Quellverformungen. Die Steinsubstanz ist stabil und ausschließlich geringfügige Risse parallel zur Lagerfläche sind erkennbar. Nach 24 Stunden wiesen die Probekörper im wassergesättigten Bereich hingegen eine mäßige Rissbildung an Oberflächen und Seitenflächen auf. Systematisch parallel zur Lagerfläche verlaufende Risse sind in diesem Umfang kritisch zu bewerten. Allerdings sind die Steine trotz Durchfeuchtung formstabil. Eine leichte Kristallbildung an der Oberfläche ist zu beobachten, offensichtlich wurden mit der Durchfeuchtung Inhaltsstoffe mobilisiert. Die Lehmsteinsorte erfüllt die Anforderungen der AK Ib sowie II, nach [DIN 18945].

Eine abschließende Einordnung der geprüften Lehmsteinsorten erfolgt unter Berücksichtigung der übrigen Untersuchungsergebnisse in den folgenden Kapiteln.

Die Prüfkörper des Saugversuchs wurden im Nachhinein auch im getrockneten Zustand noch einmal begutachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die Lehmsteine beider Sorten eine Wiederverfestigung nach vorangegangener Durchfeuchtung und Austrocknung erlangen. Demnach kann auf eine uneingeschränkte Rezyklierbarkeit geschlossen werden.

2.5.4 Frostprüfung

2.5.4.1 Anforderungen

Lehmsteine müssen abhängig von ihrer Anwendung ausreichend frostwiderstandsfähig sein. Es gelten die Anforderungen nach [DIN 18945, Tabelle 8]. Demnach müssen Lehmsteine der Anwendungsklasse Ia mindestens 15 Zyklen, Steine der Anwendungsklasse Ib mindestens 5 Zyklen aus Frosten und Tauen schadensfrei überstehen, d.h. die Lehmsteine dürfen nach der jeweiligen Zyklenanzahl keine erkennbaren Risse oder Quellverformungen sowie Absprengungen aufweisen.

2.5.4.2 Prüfvorgang

Für die Prüfung sind drei Lehmsteine je Sorte bei Normklima zu konditionieren, anschließend auf ihre schmale, lange Seite zu stellen und die gegenüberliegende Fläche über eine aufgelegte Kompresse mit 0,5 g Wasser je cm² Steinfläche zu tränken. Nachfolgend werden die so präparierten Lehmsteine für 24 Stunden bei 23 °C in einem geschlossenen Behälter aufbewahrt und anschließend für 10 Stunden in eine Frosttruhe gegeben. Nach jedem zweiten Zyklus ist

die Oberseite erneut mit 0,25 g Wasser je cm² Steinfläche zu beaufschlagen. Weisen die Lehmsteine nach dem ersten Zyklus keine Risse, bleibende Quellverformungen oder Abplatzungen auf, kann die Prüfung fortgesetzt werden, bis die erforderliche Anzahl Frost-Tau-Wechsel schadensfrei durchlaufen wurde.

2.5.4.3 Ergebnisse

Die nach [DIN 18945] erfolge Beurteilung der Lehmsteine 21055_S2 ergab gleichbleibende Ergebnisse nach Zyklus Nummer 1 und 3. Feinste Risse im Bereich ± 0,1 mm parallel zur beaufschlagten Fläche sowie eine geringe Kantenstabilität bei sanftem Druck sind bemerkenswert. Abplatzungen und Quellverformungen sind nicht zu beobachten. Nach Zyklus Nummer 5 sind eine delaminierte Ecke bei Stein Nr. II, generell vereinzelt Risse an Oberfläche und Kantenbereich und grundlegend systematische feine Rissbildungen an Seitenflächen parallel zur beaufschlagten Fläche dokumentiert worden. Inzwischen sind die oberen Kalten der Steine sehr druckempfindlich. Es gibt Mikroabplatzungen an Steinoberfläche Nr. III. Generell sind größere Abplatzungen infolge von Transport oder Lagerung bei mäßiger Belastung entstanden, die auf eine deutlich geschwächte Oberfläche schließen lassen. Die Lehmsteinsorte 21055_S2 erfüllt nicht die Anforderungen der AK Ib.

Bei der nach [DIN 18945] erfolgen Beurteilung der Lehmsteine 21055_S8 nach Zyklus Nummer 1, 3 und 5 konnten keine Risse, Quellverformungen oder Abplatzungen verzeichnet werden. Die Lehmsteinsorte 21055_S8 hat die Anforderungen der AK Ib sicher erfüllt.
Beide Lehmsteinsorten zeigen deutliche weißliche Ränder, die von mobilisierten Inhaltsstoffen, etwa Salzen stammen können.

Eine abschließende Einordnung der geprüften Lehmsteinsorten erfolgt unter Berücksichtigung der übrigen Untersuchungsergebnisse im folgenden Kapitel.

2.5.5 Bewertung des Feuchte- und Frostverhaltens

Für die Bewertung des Verhaltens unter Feuchteeinwirkung, das für die Zuordnung in die Anwendungsklassen von Lehmsteinen maßgebend ist, werden die Ergebnisse der Tauch-, der Kontakt- und der Saugprüfung gleichermaßen herangezogen. Erfüllen Lehmsteine diesbezüglich die Anforderungen der Anwendungsklasse Ia oder Ib sind sie ebenfalls der Frostprüfung zu unterziehen. Erst deren Ergebnisse erlauben eine abschließende Klassifizierung von Lehmsteinen.
Die Lehmsteinsorte S2 kann anhand der Ergebnisse der Feuchteprüfungen und der Frostprüfung nur in Anwendungsklasse III eingestuft werden. Die Lehmsteinsorte S8 erfüllt die Anforderungen der Anwendungsklasse Ib, ist also nicht nur für die AK II (wie veranschlagt), sondern auch für die nächsthöhere Anwendungsklasse geeignet.

2.6 Gehalt an bauschädlichen Salzen

Durch die quantitative Salzanalyse mittels Probenentnahme, Trocknung und Wägung von repräsentativen Probenmaterial soll die vorhandene Belastung von Baustoffen mit bauschädlichen Salzen ermittelt und bewertet werden. Die Höhe der Belastung nimmt entscheidend Einfluss auf die Rezyklierbarkeit betroffener Baustoffe.

2.6.1 Anforderungen

Nach [DIN 18945] müssen die Lehmsteine der Anwendungsklasse Ia, Ib und II die in Tabelle 9 dargestellten Grenzwerte einhalten.

Nach DIN 18945 "Lehmsteine - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung"				
[M.-%]				
Nitrate	≤ 0,02	> 0,02	∑ Anionengehalt	
Sulfate	≤ 0,10	> 0,10		
Chloride	≤ 0,08	> 0,08	≤ 0,12	> 0,12
Bewertung	zulässig	nicht zulässig	zulässig	nicht zulässig

Tabelle 9: Anforderungen an Baustoffe zum Gehalt an bauschädlichen Salzen nach [DIN 18945]

2.6.2 Prüfvorgang

Wie in der qualifizierten Bauwerksdiagnostik üblich, wird bei den entnommenen Materialproben der Gehalt an bauschädlichen Anionen (Nitrat, Sulfat und Chlorid) bestimmt. Dazu werden die Proben nach der Trocknung (Darr-Methode mit Trocknungstemperatur von 40 °C) zunächst aufgemörsert und homogenisiert, anschließend jeweils 5 g pro Probe in 200 ml demineralisiertes Wasser gegeben und für 24 Stunden gerührt. Das Wasser-Feststoffgemisch wird abfiltriert und anschließend die Anionen der gelösten Salze quantitativ mit Hilfe photometrischer Verfahren (System Macherey und Nagel, Nanocolor 500 D) ermittelt.

2.6.3 Ergebnisse

Die ermittelten Anionengehalte in Masse-% sind zusammen mit den einzuhaltenden Grenzwerten in Tabelle 10 und in Abbildung 4 dargestellt.

lfd. Nr.	Proben-bezeichnung	Nitrate		Sulfate		Chloride		∑ Anionen-gehalt
			M.-%		M.-%		M.-%	in M.-%
1	21055_S2	<	0,02		0,15		0,01	0,18
2	21055_S8	<	0,02	<	0,08		0,02	0,11

Tabelle 10: Übersicht der Ergebniswerte – Gehalte der Anionen Nitrate, Sulfate und Chloride

Die Lehmsteinsorte 21055_S2 überschreitet mit 0,15 M.-% den zulässigen Einzelwert von ≤ 0,10 M.-% bei Sulfaten und damit den zulässigen Gesamtgehalt von ≤ 0,12 M.-%. Die Lehmsteinsorte 21055_S8 erfüllt die nach [DIN 18945] vorgeschriebenen Anforderungen. Zum Verständnis aller Ergebniswerte ist zu anzumerken, dass die Ergebniswerte, die mit einem „kleiner als" gekennzeichnet sind, die Nachweisgrenze der hier genutzten Analysemethode darstellen.

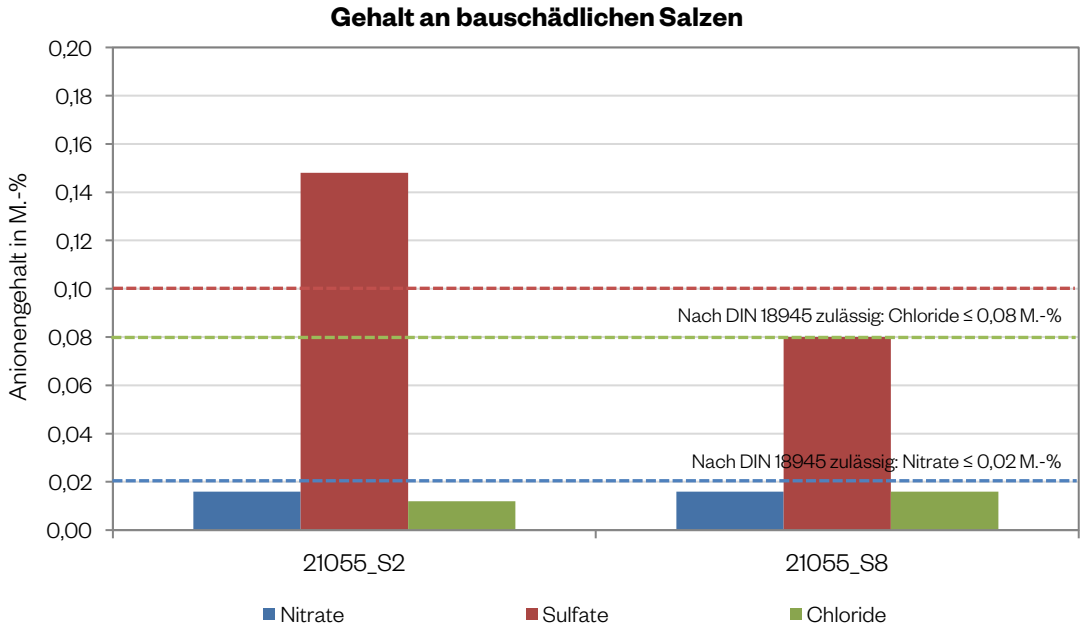


Abbildung 4: Übersicht der Ergebniswerte mit Darstellung der zulässigen Grenzwerte nach [DIN 18945]

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in den vorgenannten Prüfungen erzielten Ergebnisse sind in folgender Übersicht zusammenfasst.

Eigenschaften der Lehmsteine	21055_S2	21055_S8
Form	quaderförmig mit Abweichungen	quaderförmig
Lochung	Ungelocht, Lehmvollstein	Ungelocht, Lehmvollstein
Maße (Mittelwerte) Länge x Breite x Höhe in mm	251 x 125 x 70	247 x 119 x 75
Formatkurzzeichen	S	S
Steinrohdichteklasse	2,0	1,8
Wärmeleitfähigkeit λ in W/m·K	0,91	0,73
Dampfdiffusionswiderstandsfaktor μ	5/10	5/10
Baustoffklasse	A1	A1
Tauchprüfung, Masseverlust in % Ausgangsmasse	≤ 20	≤ 5

Eigenschaften der Lehmsteine	21055_S2	21055_S8
Kontaktprüfung	Risse, keine Quellverformung	Keine Risse, keine Quellverformung
Saugprüfung in h	< 0,5	≥ 3
Frostprüfung in Zyklen	< 5	≥ 5
Gehalt an bauschädlichen Salzen in M.-%	> 0,12	< 0,12
Anwendungsklasse (kurz: AK)	III	Ib
Einsatz für Mauerwerk	tragend	nicht tragend

Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse, Überschreitungen der nach [DIN 18945] zulässigen Grenzwerte sind rot hervorgehoben

Die Einstufung in die Anwendungsklasse erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse zum Feuchteverhalten, wobei die sich ergebende geringste Einstufung maßgebend ist.

Insgesamt ist die Lehmsteinsorte 21055_S2 in die Anwendungsklasse III (trockene Anwendungen (z.B. Deckenfüllungen, Stapelwände) einzuordnen, allerdings aber prinzipiell geeignet für den tragenden Einsatz. Umgekehrt verhält es sich bei den Lehmsteinen der Sorte 21055_S8: Die Anforderungen der Anwendungsklasse Ib (durchgängig verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk) werden zwar erfüllt, allerdings kann die Sorte anhand der geringeren Druckfestigkeit nur für den nichttragenden Einsatz verwendet werden.
Beide Lehmsteinsorten halten das angestrebte Normalformat nicht ein, aber insbesondere bei der Sorte S2 sollte hinsichtlich des Feuchtverhaltens eine Rezepturanpassung vorgenommen werden.

4 Verzeichnisse

4.1 Literatur

[DIN 4102-1:1998-05] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 4102-1:1998-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe: Mai 1998

[DIN 4102-4:2016-05] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 4102-4:2016-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe: Mai 2016

[DIN 4108-4:2020-11] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 4108-4:2020-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden- Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Ausgabe: November 2020

[DIN 18945:2024-03] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 18945:2018-12: Lehmsteine - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren, Ausgabe: Dezember 2018

[DIN EN ISO 12572:2017-05] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN EN ISO 12572:2017-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Ausgabe: Mai 2017

[DVL, 2009] Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.): Lehmbau Regeln, 3., überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

4.2 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der beauftragten Prüfungen 3
Tabelle 2: Zulässiger Lochanteil und Mindeststegdicke von Lehmsteinen 4
Tabelle 3: Maße von Lehmsteinen nach Tabelle 4 der [DIN 18945] 5
Tabelle 4: Übersicht der ermittelten Abmessungen und der sich nach [DIN 18945] daraus ergebenden Formatkurzzeichen, Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte sind rot hervorgehoben 6
Tabelle 5: Anhand der Steinrohdichten erfolgte Einstufung der Wärmeleitfähigkeiten und Angabe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 7
Tabelle 6: Druckfestigkeitsklassen von Lehmsteinen gemäß [DIN 18945] 8
Tabelle 7: Übersicht der ermittelten Druckfestigkeitsergebnisse 9
Tabelle 8: Anforderungen an die Feuchte- und Frostwiderstandsfähigkeit gemäß [DIN 18945] 10
Tabelle 9: Anforderungen an Baustoffe zum Gehalt an bauschädlichen Salzen nach [DIN 18945] 15

Tabelle 10: Übersicht der Ergebniswerte – Gehalte der Anionen Nitrate, Sulfate und Chloride 15
Tabelle 11: Übersicht der Ergebnisse, Überschreitungen der nach [DIN 18945] zulässigen Grenzwerte sind rot hervorgehoben 17

4.3 Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht der ermittelten mittleren Steinrohdichten inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten Klassengrenzen der maßgebenden Rohdichteklassen 7
Abbildung 2: Übersicht der ermittelten mittleren Druckfestigkeiten inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten Klassengrenzen der maßgebenden Druckfestigkeitsklassen 9
Abbildung 3: Übersicht der ermittelten mittleren Masseverluste infolge Tauchprüfung inkl. Standardabweichungen und der in [DIN 18945] definierten maximal zulässigen Masseverluste der AK Ia und AK Ib sowie AK II 11
Abbildung 4: Übersicht der Ergebniswerte mit Darstellung der zulässigen Grenzwerte nach [DIN 18945] 16

5 Formale Aspekte

5.1 Urheberrecht

Dieser Prüfbericht darf nur in Verbindung mit den beschriebenen Lehmsteinen verwendet werden. Alle Urheberrechte verbleiben bei den Autoren.

5.2 Umfang

Dieser Bericht umfasst insgesamt 20 Seiten Text einschließlich Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zuzüglich 19Seiten Anlagen, so dass sich ein Gesamtumfang von 39 Seiten ergibt.

Berlin, 3. Mai 2024

Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert

Name Prüferin

BAUKAMMER BERLIN Dr.-Ing. Christof Ziegert Beratender Ingenieur P 3029 Pflicht Mitglied

Von der Industrie- und Handelskammer zu Berlin Dr.-Ing. Christof Ziegert Sachverständiger für Schäden im Lehmbau öffentlich bestellt und vereidigt

Prüfbericht

Erstprüfung für Lehmsteine

gemäß DIN 18945:2024-03

Anhang

Anhang 1: Ergebnisprotokolle

Projekt:	upMIN100
Projekt-Nr.:	21055
Auftraggeber (AG):	Natural Building Lab (NBL) Technische Universität Berlin Straße des 17. Juni 135 10623 Berlin
Auftragnehmer (AN):	Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert ZRS Ingenieure GmbH Schlesische Straße 26, Aufgang A D-10997 Berlin Tel.: 030 / 398 00 95 0 Fax: 030 / 398 00 95 66 ziegert@zrs.berlin

ZR
S

Charakterisierende Probenbeschreibung

Projekt: 21055_upMin100

Probenbezeichnung	Probenbeschreibung
21055_Probe_1	NKA-Schluff aus Boden
21055_Probe_2	NKA-Schluff aus Boden-/Bauschuttgemisch
21055_Probe_3	Filderlehm/natur
21055_Probe_4	NKA-Sand 0/2
21055_Probe_5	Baustoffsand 0/2
21055_Probe_6	Betonsand 0/2
21055_Probe_7	Bodenaushub
21055_Probe_8	Steinfreier Boden ohne Kalk

ZR
S

Rezepturentwicklung

Projekt: 21055_upMin100
Prüfdatum: 01.08.2023

Proben-bezeichnung	Mischungsverhältnis Rezeptur														Materialbeschreibung
	Betonsand 1.1		NKA-Sand 1.2		Carbo. Betonsand 1.5		Sand ZRS Flusssand		Bodenaushub 1.4 c		Filder 2.3		Baulehm Claytec		
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	
21055_M1	340	17	-	-	-	-	1060	53	-	-	-	-	600	30	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M2	-	-	610	28	-	-	840	39	-	-	-	-	700	33	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M3	-	-	-	-	273	13	1140	54	-	-	-	-	687	33	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M4	374	17	616	28	-	-	500	23	-	-	-	-	710	32	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M5	-	-	672	28	312	13	580	24	-	-	-	-	816	35	Verarbeitbarkeit gut, mittleres Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M6	340	17	560	28	-	-	500	25	-	-	600	30	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M7	-	-	560	28	260	13	580	29	-	-	600	30	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz
21055_M8	340	17,5	560	29	450	23	-	-	-	-	600	30,5	-	-	Verarbeitbarkeit gut, weniger Entwässerungsverhalten, Unterputz

ZR
S

Trocknungsprotokoll

Projekt: 21055_upMin100

Konditionierung (23 °C, 50 % r. LF)

	Masse$_{Behälter+Probe}$ in g			
Probenbezeichnung	vor Versuch 00.08.2018	Trocknung 28.08.2023	Trocknung 29.08.2023	Masse-differenz
21055_M1_I		-	-	-
21055_M1_II		438,72	438,72	0,00
21055_M1_III		438,54	438,52	0,00
21055_M2_I		475,42	475,44	0,00
21055_M2_II		489,08	489,07	0,00
21055_M2_III		480,33	480,33	0,00
21055_M3_I		448,70	448,70	0,00
21055_M3_II		465,69	465,66	0,01
21055_M3_III		459,18	459,18	0,00
21055_M4_I		437,52	437,51	0,00
21055_M4_II		444,16	444,16	0,00
21055_M4_III		448,15	448,15	0,00
21055_M5_I		439,53	439,52	0,00
21055_M5_II		450,20	450,22	0,00
21055_M5_III		451,97	451,97	0,00
21055_M6_I		425,49	425,49	0,00
21055_M6_II		424,65	424,65	0,00
21055_M6_III		428,81	428,83	0,00
21055_M7_I		433,21	433,22	0,00
21055_M7_II		430,13	430,14	0,00
21055_M7_III		436,64	436,61	0,01
21055_M8_I		400,88	400,88	0,00
21055_M8_II		403,99	403,98	0,00
21055_M8_III		402,41	402,41	0,00

Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander abweichen.

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M1

Materialbezeichnung		M1					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	1.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	28					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm			156,9		156,9	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☐		☑		☑	
Schwindmaß	%	100,0		2,0		1,9	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	1,9					
Standardabweichung	%	0,01					
Abweichung vom Mittelwert	%			0		0	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,3		38,6		38,5	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	39,0		38,9		39,0	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	-		438,7		438,5	
Volumen	cm³	0,00		235,74		235,28	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☐		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	#WERT!		1861,00		1863,81	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1862,40					
Standardabweichung	kg/m³	1,99					
Abweichung vom Mittelwert	%			0		0	
Bruchlast Biegezugversuch	N	-		131		134	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☐		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	#WERT!		0,3		0,3	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,3					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%			1		1	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1190	1180	1220	1140	1210	1010
Druckfläche	mm²	1534		1545		1539	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	0,8					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	3	2	5	2	4	13

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M2

Materialbezeichnung		M2					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	1.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	28					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	158,3		158,6		158,8	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	1,1		0,9		0,8	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	0,9					
Standardabweichung	%	0,14					
Abweichung vom Mittelwert	%	17		3		14	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	37,6		39,3		38,7	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	39,5		39,1		38,9	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	475,4		489,1		480,3	
Volumen	cm³	235,55		243,48		239,06	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	2018,44		2008,69		2009,22	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	2012,12					
Standardabweichung	kg/m³	5,48					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		0		0	
Bruchlast Biegezugversuch	N	284		310		312	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,7		0,8		0,8	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,8					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	5		1		4	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	3140	2810	2860	3150	3270	3160
Druckfläche	mm²	1505		1570		1547	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	2,1	1,9	1,8	2,0	2,1	2,0
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	2,0					
Standardabweichung	N/mm²	0,1					
Abweichung vom Mittelwert	%	5	6	8	1	6	3

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M3

Materialbezeichnung		M3					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	1.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	28					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	157,6		157,8		157,2	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	1,5		1,4		1,8	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	1,6					
Standardabweichung	%	0,20					
Abweichung vom Mittelwert	%	4		10		14	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,2		39,5		38,6	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	39,0		39,2		39,1	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	448,7		465,7		459,2	
Volumen	cm³	234,99		244,12		236,96	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1909,46		1907,51		1937,77	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1918,24					
Standardabweichung	kg/m³	16,93					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		1		1	
Bruchlast Biegezugversuch	N	199		205		200	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,5		0,5		0,5	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,5					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	1		0		0	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1710	1830	1770	1720	1770	1640
Druckfläche	mm²	1528		1580		1542	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	1,1					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	0	7	0	3	2	5

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M4

Materialbezeichnung		M4					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	1.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	28					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	157,6		157,8		157,1	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	1,5		1,4		1,8	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	1,6					
Standardabweichung	%	0,21					
Abweichung vom Mittelwert	%	3		12		15	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,0		38,5		39,0	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,9		39,1		39,1	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	437,5		444,2		448,2	
Volumen	cm³	232,98		237,52		239,27	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1877,88		1870,03		1872,98	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1873,63					
Standardabweichung	kg/m³	3,96					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		0		0	
Bruchlast Biegezugversuch	N	136		147		133	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,4		0,4		0,3	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,4					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		6		5	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1280	1200	1230	1330	1310	1220
Druckfläche	mm²	1520		1540		1560	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	0,8					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	3	4	3	5	3	5

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M5

Materialbezeichnung		M5					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	4.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	25					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	156,6		157,4		157,1	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	2,1		1,6		1,8	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	1,9					
Standardabweichung	%	0,25					
Abweichung vom Mittelwert	%	14		12		2	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	37,5		39,5		39,2	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	39,0		38,9		39,0	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	439,5		450,2		542,0	
Volumen	cm³	228,75		241,38		240,16	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1921,41		1865,22		2256,71	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	2014,45					
Standardabweichung	kg/m³	211,68					
Abweichung vom Mittelwert	%	5		7		12	
Bruchlast Biegezugversuch	N	170		186		186	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,4		0,5		0,5	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,5					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	3		1		1	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1570	1510	1610	1590	1710	1610
Druckfläche	mm²	1500		1578		1568	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	1,0					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	1	3	1	2	6	1

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M6

Materialbezeichnung		M6					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	4.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	25					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	155,3		155,9		155,4	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	3,0		2,6		2,9	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	2,8					
Standardabweichung	%	0,20					
Abweichung vom Mittelwert	%	6		8		2	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,3		38,2		39,1	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,5		38,8		38,8	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	425,5		424,7		428,8	
Volumen	cm³	229,27		231,40		235,73	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1855,88		1835,13		1819,19	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1836,73					
Standardabweichung	kg/m³	18,40					
Abweichung vom Mittelwert	%	1		0		1	
Bruchlast Biegezugversuch	N	174		171		177	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,5		0,4		0,5	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,5					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	2		1		0	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1560	1700	1590	1530	1680	1760
Druckfläche	mm²	1532		1530		1562	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	1,1					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	4	5	2	6	1	6

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M7

Materialbezeichnung		M7					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	4.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	25					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	154,7		154,8		155,1	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	3,3		3,2		3,1	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	3,2					
Standardabweichung	%	0,13					
Abweichung vom Mittelwert	%	3		1		4	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,0		37,8		38,2	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,5		38,8		38,8	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	433,2		430,1		436,6	
Volumen	cm³	226,66		227,04		229,43	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1911,28		1894,58		1902,99	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1902,95					
Standardabweichung	kg/m³	8,35					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		0		0	
Bruchlast Biegezugversuch	N	192		244		251	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,5		0,6		0,7	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,6					
Standardabweichung	N/mm²	0,1					
Abweichung vom Mittelwert	%	15		7		9	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	2080	2160	2080	2140	1860	2220
Druckfläche	mm²	1520		1512		1526	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,5
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	1,4					
Standardabweichung	N/mm²	0,1					
Abweichung vom Mittelwert	%	1	3	0	3	11	6

ZR
S

Lineares Trocknungsschwindmaß, Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN 18947:2023-06

Projekt: 21055_upMin100

Probe: 21055_M8

Materialbezeichnung		M8					
Prüfkörpernummer		1		2		3	
Datum der Herstellung	TT.MM.JJ	4.8.2023					
Ausgangskonsistenz		trocken					
Ausbreitmaß	mm	-					
Lagerung in der Form	Tage	7					
Lagerung ausgeschalt	Tage	7					
Prüferin/ Datum der Prüfung	Härder	29.8.2023					
Prüfalter	Tage	25					
Prüfung Temperatur / Luftfeuchte	°C / %	23/50					
Lagerungsdauer unter Prüfklima	h	336					
Länge (mit Einbaufeuchte)	mm	160,0		160,0		160,0	
Länge (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	154,7		154,7		154,6	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Schwindmaß	%	3,3		3,3		3,4	
Lineares Trocknungsschwindmaß (Mittelwert)	%	3,3					
Standardabweichung	%	0,05					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		1		2	
Breite (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	37,8		38,0		38,1	
Höhe (mit Ausgleichsfeuchte)	mm	38,6		38,7		38,5	
Masse (mit Ausgleichsfeuchte)	g	400,9		404,0		402,4	
Volumen	cm³	225,90		227,47		226,82	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Rohdichte (Einzelwerte/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1774,61		1775,97		1774,13	
Rohdichte (Mittelwert/ bei Ausgleichsfeuchte)	kg/m³	1774,90					
Standardabweichung	kg/m³	0,95					
Abweichung vom Mittelwert	%	0		0		0	
Bruchlast Biegezugversuch	N	165		178		162	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑		☑		☑	
Biegezugfestigkeit f (Einzelwerte)	N/mm²	0,4		0,5		0,4	
Biegezugfestigkeit f (Mittelwert)	N/mm²	0,4					
Standardabweichung	N/mm²	0,0					
Abweichung vom Mittelwert	%	2		5		4	
Prismenhälfte		1_a	1_b	2_a	2_b	3_a	3_b
Bruchlast Druckversuch F	N	1740	1610	1570	1640	1550	1770
Druckfläche	mm²	1513		1519		1525	
Soll Wert in Mittelwert einberechnet werden?		☑	☑	☑	☑	☑	☑
Druckfestigkeit (Einzelwerte)	N/mm²	1,2	1,1	1,0	1,1	1,0	1,2
Druckfestigkeit (Mittelwert)	N/mm²	1,1					
Standardabweichung	N/mm²	0,1					
Abweichung vom Mittelwert	%	6	2	5	0	6	7

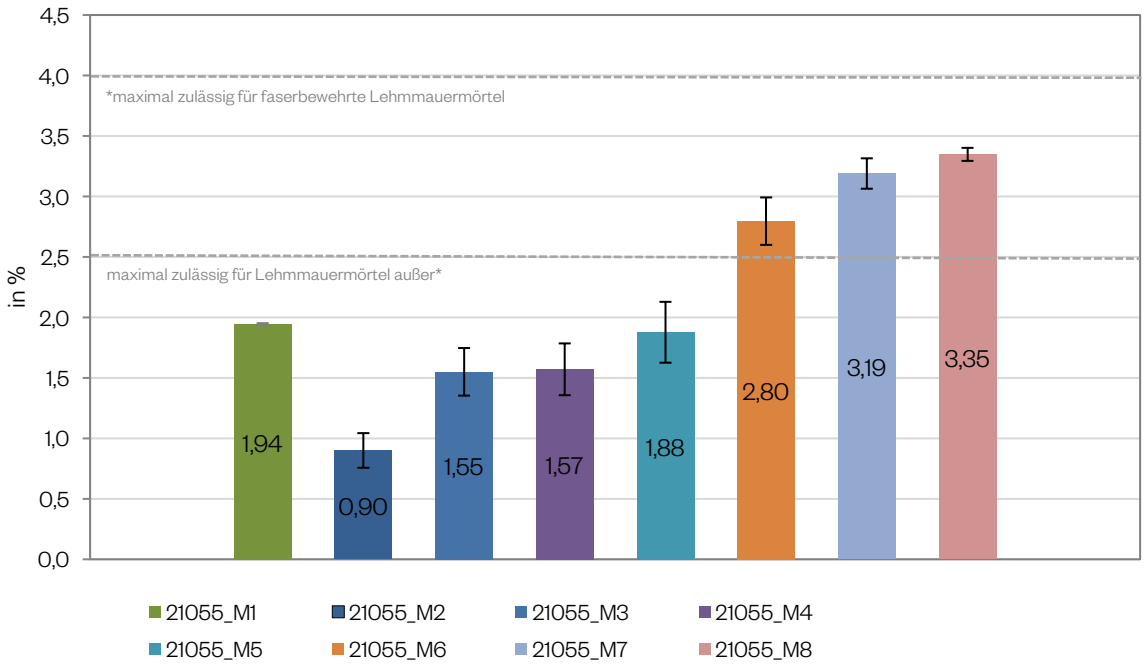
ZR
SI

Zusammenfassung der Mittelwerte für Schwindmaß, Rohdichte sowie Druck- und Biegezugfestigkeit, Haftfestigkeit und Abrieb

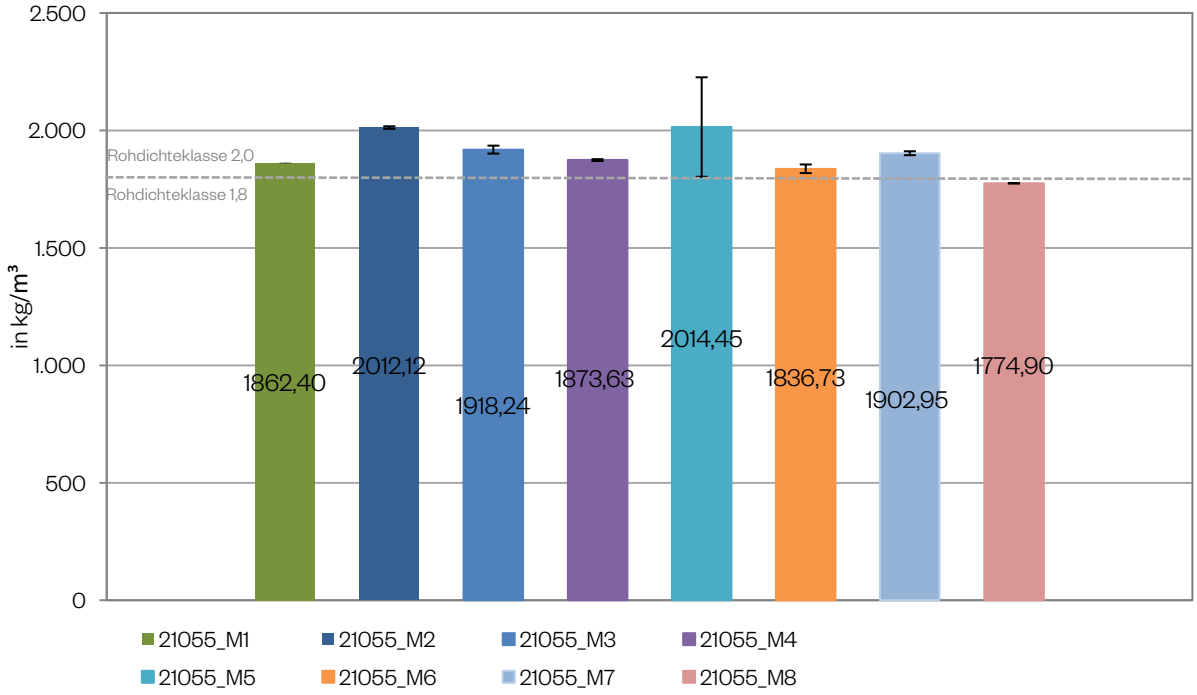
Projekt: 21055_upMIN100

Proben-bezeichnung	Schwindmaß in %		Rohdichte in kg/m³		Druckfestigkeit in N/mm²		Biegezug-festigkeit in N/mm²	
	Mittel-wert	Standard-abweich-ung	Mittel-wert	Standard-abweich-ung	Mittel-wert	Standard-abweich-ung	Mittel-wert	Standard-abweich-ung
21055_M1	1,94	0,01	1862,40	1,99	0,75	0,02	0,34	0,01
21055_M2	0,90	0,14	2012,12	5,48	1,99	0,13	0,77	0,04
21055_M3	1,55	0,20	1918,24	16,93	1,12	0,04	0,51	0,00
21055_M4	1,57	0,21	1873,63	3,96	0,82	0,03	0,35	0,02
21055_M5	1,88	0,25	2014,45	211,68	1,03	0,04	0,46	0,01
21055_M6	2,80	0,20	1836,73	18,40	1,06	0,04	0,45	0,01
21055_M7	3,19	0,13	1902,95	8,35	1,38	0,08	0,60	0,08
21055_M8	3,35	0,05	1774,90	0,95	1,08	0,05	0,45	0,02

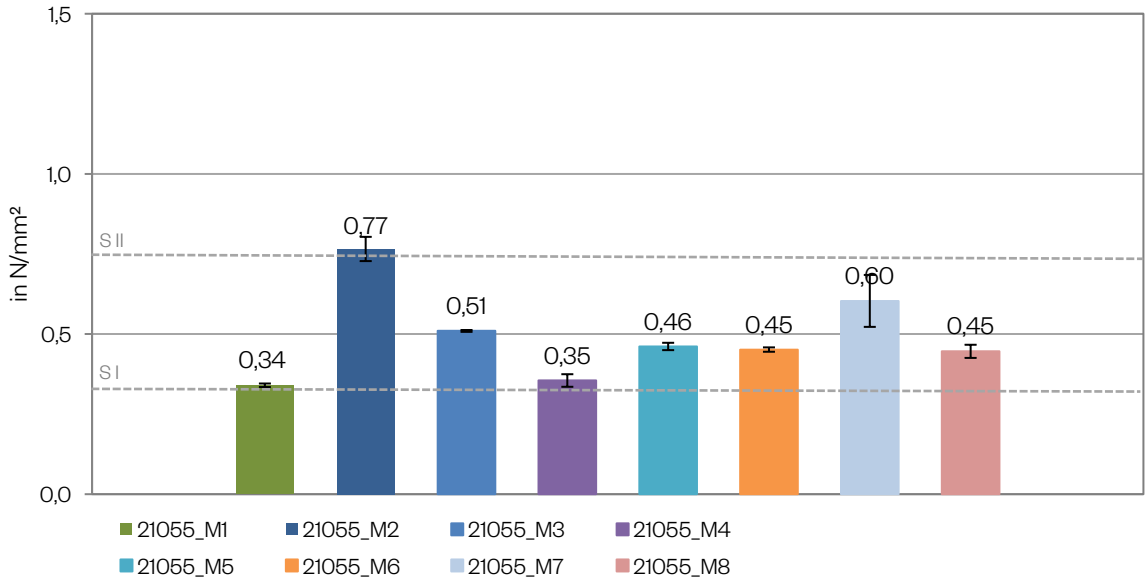
Lineares Trocknungsschwindmaß in %

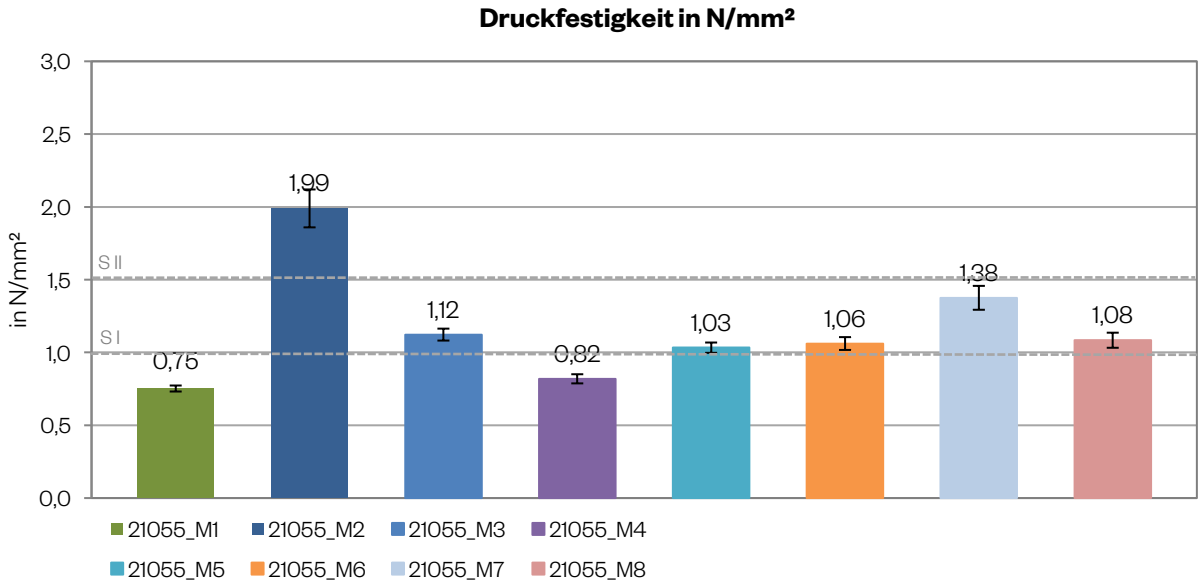


Trockenrohdichte in kg/m³



Biegezugfestigkeit in N/mm²




Druckfestigkeit in N/mm²
in N/mm²
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
S II
S I
0,75
1,99
1,12
0,82
1,03
1,06
1,38
1,08
21055_M1
21055_M2
21055_M3
21055_M4
21055_M5
21055_M6
21055_M7
21055_M8

ZR
S

Aufnahmedaten

Projekt: 21055_upMIN100

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Entnahmematerial	auszuführende Untersuchungen
1	21055_Probe_1	NKA-Schluff aus Boden	Salzanalyse
2	21055_Probe_2	NKA-Schluff aus Boden-/Bauschuttgemisch	Salzanalyse
3	21055_Probe_3	Filderlehm/natur	Salzanalyse
4	21055_Probe_4	NKA-Sand 0/2	Salzanalyse
5	21055_Probe_5	Baustoffsand 0/2	Salzanalyse
6	21055_Probe_6	Betonsand 0/2	Salzanalyse
7	21055_Probe_7	Bodenaushub	Salzanalyse
8	21055_Probe_8	Steinfreier Boden ohne Kalk	Salzanalyse

Bemerkung: Die Proben weisen mitunter einen störend starken Geruch auf.

Abbildung: Probenübersicht vor Trocknung zur Vorbereitung der Salzanalyse

ZR
S

Trocknungsprotokoll

Projekt: 21055_upMIN100

Trocknung (40 °C)

	$Masse_{Behälter+Probe}$ in g				
Probenbezeichnung	vor Versuch 00.08.2018	Trocknung 19.09.2022	Trocknung 20.09.2022	Masse-differenz	Behältermasse
21055_Probe_1	k. A.	131,00	130,98	0,0	k. A.
21055_Probe_2	k. A.	115,14	115,14	0,0	k. A.
21055_Probe_3	k. A.	130,24	130,23	0,0	k. A.
21055_Probe_4	k. A.	189,53	189,54	0,0	k. A.
21055_Probe_5	k. A.	112,70	112,71	0,0	k. A.
21055_Probe_6	k. A.	125,80	125,80	0,0	k. A.
21055_Probe_7	k. A.	135,06	135,06	0,0	k. A.
21055_Probe_8	k. A.	105,72	105,72	0,0	k. A.

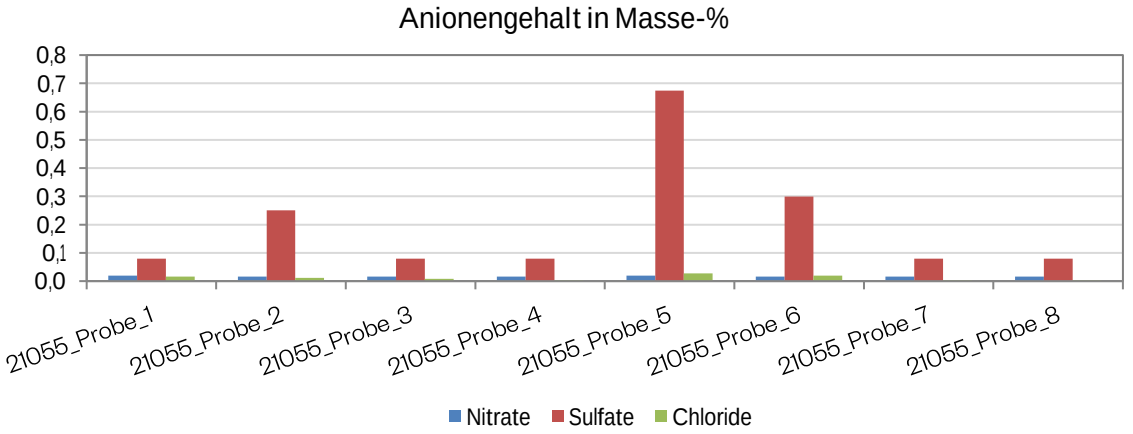
Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinanderfolgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander abweichen.

ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 21055_upMIN100

lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Entnahmematerial		Nitrate			Sulfate			Chloride			∑ Anionengehalt
				mg/l		Masse-%		mg/l	Masse-%		mg/l	Masse-%	Masse-%
1	21055_Probe_1	NKA-Schluff aus Boden		5		0,02	<	20	0,08		4	0,02	0,12
2	21055_Probe_2	NKA-Schluff aus Boden-/Bauschuttgemisch	<	4		0,02		63	0,25		3	0,01	0,28
3	21055_Probe_3	Filderlehm/natur	<	4		0,02	<	20	0,08		2	0,01	0,10
4	21055_Probe_4	NKA-Sand 0/2	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10
5	21055_Probe_5	Baustoffsand 0/2		5		0,02		169	0,67		7	0,03	0,72
6	21055_Probe_6	Betonsand 0/2	<	4		0,02		75	0,30		5	0,02	0,33
7	21055_Probe_7	Bodenaushub	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10
8	21055_Probe_8	Steinfreier Boden ohne Kalk	<	4		0,02	<	20	0,08		1	0,00	0,10



ZR
S

Quantitativer Nachweis auf Anionen mittels photometrischer Verfahren

Projekt: 21055_upMIN100

Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauerwerkskörpern

Nach DIN 18947:2018-12 "Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung"			
Nitrat	Sulfat	Chlorid	Belastung
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	
< 0,02	< 0,10	< 0,08	gering

Nach Einschätzung des büroeigenen Prüflabors (orientiernde Werte)			
0,02	0,10	0,08	mittel[1]
>0,02	>0,10	>0,08	hoch[2]

[1] Salzbelastung im Grenzbereich

[2] Unzulässige Salzbelastung