

Entwicklung eines Konzepts zur ressourcen- und naturschutzgerechten Konstruktion von Lehmlärmschutz

**Naturschutz hochklappen – innovativer Lärmschutz
als vertikale Ausgleichsmaßnahme**

Leuchtturmprojekt für Brandenburg – Prototypentwicklung für Europa

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------------------------|
| Az | 35556 | Referat | 25 | Fördersumme | 118.600,57 |
| Antragstitel | | Naturschutz hochklappen - Innovativer Lärmschutz als vertikale Ausgleichsmaßnahme | | | |
| Stichworte | | | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | | |
| | 1.1.2020 | 28.02.2022 | | | |
| Zwischenberichte | 24.08.2020 | | | | |
| | | | | | |
| Bewilligungsempfänger | Zentrum für Peripherie | | | Tel | +49-38793-904808 0151-50955255 |
| | | | | Fax | |
| | | | | Projektleitung | |
| | | | | Ute Reeh | |
| | | | | Bearbeiter | |
| | | | | Jakob Scheumann | |
| Kooperationspartner | Technische Hochschule Lübeck | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Im Rahmen von **Naturschutz hochklappen – Innovativer Lärmschutz als vertikale Ausgleichsmaßnahme** prüfen wir folgende Aspekte der Grundidee.

1. Prozessinnovation im Sinne spartenübergreifender Zusammenarbeit
2. Die Schallschutzwirkung von Lehm und die Entwicklung von Verfahren und Materialien zur Steigerung der Schallabsorption
3. Optimierungen der Bauweise (Form), Standsicherheit und Statik
4. Erosionsbremsen, die zugleich Nisthilfen sind im Stampflehm
5. Erhöhung der Druckfestigkeit in der Bauweise Wellerlehm
6. Die Oberfläche Wellerlehm
7. Materialentwicklung für beide Technologien mit dem Aushub vor Ort
8. Die Fundamente und deren Optimierung
9. Die Abdeckung

10. Kostenschätzungen und Berechnungen
11. Die Bewertung als Ausgleichsmaßnahme
12. Die Darstellung von Partizipation und Prozess
13. Die Transparenz der Kommunikation und Transparenz
14. Analyse
15. „Brandenburgs Alhambra“
16. Fortsetzung der Forschungsarbeit: „Entwicklung im Maschinenbau“, Fortführung von Grundlagenforschung, Tests und Untersuchungen

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Erstes Halbjahr 2020

Einbeziehen der Kinder und Bildungseinrichtungen der Region zur Produktion von „Erosionsbremsen“. Die Kinder trugen die Projektidee in die Haushalte der Region. Parallel berichtete die regionale Tageszeitung „Der Prignitzer“ erstmals über die Idee des Lehmlärmschutzes / Naturschutz hochklappen. Parallel dazu entwickelte das Forschungsteam zu Projektstart die Grundideen weiter.

Untersuchungsbereich Akustik

Das Bauunternehmen STRABAG ist unter der Voraussetzung der Rechte an der entwickelten Technik an der Zusammenarbeit interessiert gewesen. Das ist mit einer öffentlichen Förderung nicht kompatibel und wäre nicht im Projektsinn. Eine Kooperation ist deshalb nicht zustande gekommen.

Der Fachbereich Bauwesen der Technischen Hochschule Lübeck unter Prof. Heiner Lippe übernahm vorübergehend Berechnungen der Schallschutz-Akustik. Ab Mitte 2020 hat die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) den Akustikbereich übernommen.

Vor dem Kindergarten in Nebelin, neben dem Dorfgemeinschaftshaus, wurde eine 220 cm hohe und 8 Meter lange Test- und Demonstrationswand errichtet. Alle technologischen Projektideen wurden hier erprobt und umgesetzt. So entstand ein anschauliches Demonstrationsobjekt, anhand dessen sich alle 2020 untersuchten Aspekte verfolgen lassen.

Juni 2020

Die Eröffnung der Probewand fand mit zahlreichen Gästen – Dorfbewohner:innen, Fachpublikum, Pressevertreter:innen, Politiker:innen Vertreter:innen des Landkreises und des Umweltministeriums, der Bundesanstalt für Straßenwesen, der Architektenkammer Brandenburg, der Baukulturinitiative Brandenburg, des Biosphärenreservats Flusslandschaft Elbe Brandenburg und der Bundesstiftung Baukultur statt. Reaktionen haben gezeigt, dass das traditionelle Baumaterial Lehm in Region kaum noch präsent ist und mittels der Demonstrationswand die Projektidee nun aber greifbar wird. Auf die Frage danach, welche Lebensdauer die Wand habe, nutzte Prof. Heiner Lippe die Alhambra in Granada, Spanien als Beispiel. Die jährliche Niederschlagsmenge der Region dort entspricht derjenigen der Prignitz. Die bis zu 20 Meter hohe Stampflehm-Umfassungsmauer der Alhambra steht seit 700 Jahren und wurde im Gespräch zur Metapher für Dauerhaftigkeit und Baukultur.

Infolge der Einweihung sind folgende Institutionen als Projektpartner hinzugekommen: die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), das Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe Brandenburg, das Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUK), die Brandenburgische Architektenkammer, die Baukulturinitiative Brandenburg, die Bundesstiftung Baukultur. Im Juli titelte die Zeitung *Der Prignitzer* „Vision der Alhambra an der A14“. Diese Pressemeldung wurde zum Ursprung des Titels, „Brandenburgs Alhambra“.

Ende 2020/Anfang 2021

Die ursprüngliche Projektlaufzeit bis Ende September wurde verlängert.

Die Auswertung und die Arbeit an Skizzen, Konzepten und die filmische Dokumentation wurde vorangetrieben. Das Projekt wurde bei jeder Vorstellungsrunde weiterentwickelt. Im Januar 2021 fand der erste Ideenfindungs- und Planungsworkshop zu „Brandenburgs Alhambra“ statt.

Nach Zeichnungen von Martin Rauch, der Recherche zu Großpressen im Abfallentsorgungsbereich und in der Landwirtschaft baute der Prignitzer Schlosser Kai Hoffmann den Kern einer hydraulischen Lehm- presse als ersten Versuchsprototyp.

Im März 2021 wurden damit erste Wellerlehmblöcke gepresst. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen lagen zwischen drei und fünfmal höher als bei traditionell verarbeitetem Wellerlehm. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Verdichtung von Wellerlehm Standfestigkeiten wie beim Stampflehm ermöglicht. Damit wäre hochverdichteter Wellerlehm für zeitgenössische Bauwerke nutzbar.

April 2021

Forschungsteam der TH Lübeck unter Prof. Heiner Lippe verlängert Laufzeit seines Projektteilbereichs. Nur die TH verfügt noch über Forschungsmittel. Ehrenamtlich arbeitet das Zentrum für Peripherie mit an zwei weiteren Presstests, die von der TH im Januar/Fabruar 2022 untersucht wurden.

Ausblick und Folgeforschung

Auf Initiative von Dr. Heike Ellner, Leiterin des Biosphärenreservats, stellte die Gemeinde Karstädt zusammen mit dem Forschungsteam einen Antrag auf Mittel aus Vermögen von Parteien und Massenorganisationen der DDR (PMO) zur Entwicklung und zum Bau einer Wellerlehmpresse. Hinzukommender Partner für die Entwicklung im Maschinenbau wurde das Forschungszentrum Strangpressen der TU Berlin.

Das Team formulierte die nötige Folgeforschung in einem Antrag. Dieser wurde zunächst als Skizze bei Zukunft Bau und dann bei der Fachagentur für nachwachsende eingereicht. Für beide Vorhaben wurde die Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung Projektpartner. Sie wird bei der Folgeforschung die Testreihen zur Druckfestigkeit konzipieren und durchführen.

Peter Vogel, Umweltingenieur aus der Prignitz, brachte die Idee ein, Reet als Armierungsmaterial für Wellerlehm zu nutzen. Die Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) Veitshöchheim hat die mögliche Verwendung von Straßenbegleitgrün im Wellerlehm nachgefragt. Beides ist prinzipiell möglich und soll in der Folge erforscht und experimentell überprüft werden. Durch den Einsatz organischen Materials lässt sich Kohlenstoff dauerhaft binden und damit die CO₂-Bilanz verbessern.

Aktueller Stand und Ausblick

Zunehmend am Projekt interessiert zeigen sich die Autobahn GmbH und das Bundesministerium für Digitales und Verkehr.

Ergebnisse und Diskussion

Druckfestigkeitstests

Diese Tests sind noch nicht abgeschlossen.

Es liegen aber bereits zwei Ergebnisse vor:

1. Verdichteter Wellerlehm hat eine vergleichbare Standfestigkeit wie Stampflehm und ist damit für bestimmte zeitgenössische Bauwerke nutzbar.
2. Die Erhöhung der Druckfestigkeit ist durch hydraulisches Pressen, aber auch durch pneumatische Verdichtung möglich. So erhöht sich die Druckfestigkeit von 1 Newton pro Quadratmillimeter (N/mm²) auf 3 bis 5 N/mm².

Schallabsorption

Es zeigt sich, dass Schall Bauwerke aus Lehm kaum zu durchdringen vermag. Allerdings hat Lehm nur eine geringe schallabsorbierende Oberflächenwirkung. Wir haben mit erfolgreichen Vorversuchen gezeigt, dass sich die Schallabsorption mit dem Einarbeiten poröser Materialien wie Hanfkalkschichten oder Heraklith-Leichtbauplatten wesentlich verbessern lässt. Eine weitere, nach ersten Tests vielversprechende Möglichkeit ist die Verwendung von Reet. Die Technologien dazu sollen im nächsten Forschungsschritt entwickelt werden.

Kohlendioxid-Bilanz

Reet und Straßenbegleitgrün lassen sich als CO₂-Speicher in Lehm einarbeiten. So ließe sich die CO₂-Bilanz noch verbessern. Darüber hinaus ist Reet strukturell sehr stabil und dauerhaft und könnte als Biomaterial möglicherweise das Geogitter im Lehm (Kunststoffgitter zur Erhöhung der Stabilität) ersetzen.

Offene Fragen

Es ergeben sich derzeit vier offene Fragen:

1. Was ergibt die Auswertung der weiteren Druckfestigkeitstests?
3. Wie lassen sich die schallabsorbierenden Materialien in den Lehm einarbeiten?
4. Wie verhält sich Lehm in Bezug auf Salzsprühnebel, der im Winter zur Straßensicherung eingesetzt wird?
5. Welche Insekten und weitere Tierarten profitieren von Lehmwänden und wie lässt sich dieser Vorteil in die Bewertungskriterien für Ausgleichsflächen übersetzen?

Themen der Folgeforschung

- Professionell durchgeführte und ausgewertete Druckfestigkeitstests von verdichteten Wellerlehmblöcken
- Lebenszyklusanalysen, die umfassender sind und dadurch die Realität besser abbilden als dies bislang mit den derzeit gültigen aber veralteten Standards möglich ist.
- Das Weiterführen der Versuche zur Schallabsorption und das Entwickeln und Testen verschiedener Materialien und deren Integration beim Bau. Untersucht werden Hanfkalk, Heraklith (Holzwohle mit dem mineralischen Bindemittel Magnesit), Reet und weitere Naturstoffe.
- Untersuchung der Auswirkung von Tausalz auf Veränderungen des Wasserhaushaltes, der Gefüge und auf die Dauerhaftigkeit der Konstruktion von Wellerlehm
- Untersuchung materialsparender Varianten für die bei Schwerlastwänden nötigen Betonfundamente
- Untersuchung betonfreier Varianten
- Präzisierung der Bedingungen für die Besiedlungsfähigkeit von Großbauwerken durch wildlebende Arten als naturschützende Maßnahme.
- Schaffung von Grundlagen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Wellerlehm als Baustoff und der daraus erstellten Bauwerke (Hochbau und Infrastrukturbauten) und Entwicklung von Ansätzen zu Integration der Nachhaltigkeitsvorteile des Baustoffs Wellerlehm auch in Zulassungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung
- Prototypische Anwendung und Prüfung von Langzeiteinflüssen auf die Trag- und Dauerhaftigkeit von Wellerlehmteilen in Infrastrukturbauten
- Standortbezogene Untersuchungen zu Materialressourcen für Wellerlehm-Bauwerke (wo und was muss für eine sinnvolle Anwendung vorhanden sein). Ziel ist Ressourcenschonendes Bauen mit regional verfügbarem Bodenaushub und nachwachsenden Rohstoffen.
- Technologieentwicklung für die serielle Produktion von Wellerlehmblöcken. Anforderungen und Abhängigkeiten herstellungsbedingter Einflussparameter (Material, Feuchte, Druck), materielle Begleitprüfungen zur Qualitätssicherung der Herstellung

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Tageszeitung „Der Prignitzer“ berichtet kontinuierlich über das Vorhaben. Seit Januar 2020 sind dort zwölf Beiträge zum Thema erschienen.

Überregional haben die Süddeutsche Zeitung (28.07.2020), der Deutschlandfunk (14.07.2020), und die taz (28.02.2022) über das Projekt berichtet.

In der Broschüre „Baukultur Sommerreise 2021“ der Bundesstiftung Baukultur stellte ein Beitrag das Vorhaben einem Fachpublikum vor.

Seit Juni 2022 steht eine Testwand am Dorfgemeinschaftshaus in Nebelin, die das Vorhaben anschaulich und greifbar darstellt.

Die Ausstellung „Brandenburgs Alhambra – Prototyp für klimaneutrale, dauerhafte und lebensfreundliche Lehmbautechnologie“ in der Gemeindeverwaltung von Karstädt stellte im Oktober 2021 einem breiten Publikum das Vorhaben und den Stand des Projekts vor.

Die Ausstellung wurde vom 1. Oktober bis Ende Januar auch im Foyer der Bundesanstalt für Straßenwesen gezeigt.

Am 22. März wird die Ausstellung in der Vertretung des Landes Brandenburg beim Bund eröffnet. Mitglieder des Forschungsteams werden die Eröffnung mit Redebeiträgen begleiten.

Am 3. und 4. Mai wird das Projekt und die Ausstellung auf dem Konvent der Baukultur in Potsdam vorgestellt und gezeigt.

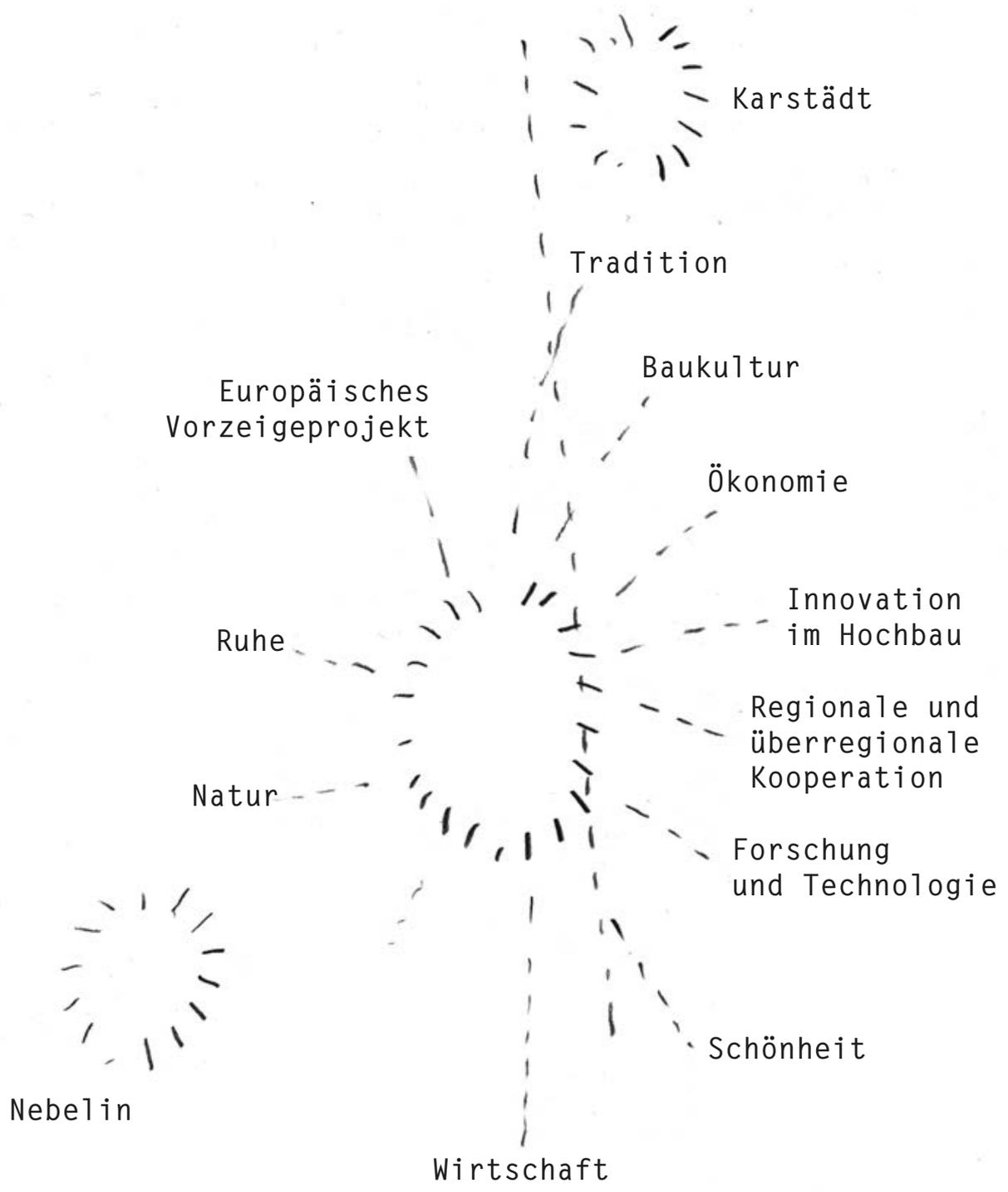
Ein achtseitiges Faltblatt in DIN-A4-Größe bereitet die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie lesefreundlich auf und gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Studie.

Die Website „[zentrum-fuer-peripherie.org](https://zentrum-fuer-peripherie.org/startseite-test/projekte/brandenburgs-alhambra/)“ informiert unter „<https://zentrum-fuer-peripherie.org/startseite-test/projekte/brandenburgs-alhambra/>“ über den Projektverlauf und gibt Hintergrundinformationen.

Fazit

Es ist mit dem Projekt gelungen, Lehm- und Lehmwellerbau, insbesondere dem bislang unterschätzten Lehmwellerbau als Ergänzung der dringend gebotenen Bauweise weitere Bausteine hinzuzufügen.

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr und die Bundesanstalt für Straßenwesen sind dabei, darüber zu beraten und wie sich Brandenburgs Alhambra als Leuchtturm- Forschungsvorhaben umsetzen lässt.



Vision

Eine Lärmschutzwand als Pilotprojekt in Lehmbautechnik ist Ausdruck zeitgemäßen, politisch verantwortlichen Handelns durch nachhaltiges und ökologisch verträgliches Bauen.

Bei den partizipativen Planungsvorgängen werden mögliche Hindernisse und Bedenken als Katalysatoren zur Weiterentwicklung von Ideen weiterverfolgt. Die neue Autobahn mit ihrem Lärmschutz und der Raststätte wird aktiv in die Lebenswelt der Region integriert, so dass Akzeptanz des Bauvorhabens erreicht wird und für die Beeinträchtigung der Landschaft ein Ausgleich geschaffen wird.

Das Projekt hat das Potenzial, Lehm als möglichem Baustoff der Zukunft zu einem wirtschaftlich relevanten Durchbruch zu verhelfen. Die Verbindung von technologischer Innovation mit Naturschutz hebt Brandenburg als Vorreiter für Innovation im Infrastrukturbereich hervor.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| ZUSAMMENFASSUNG | 13 |
| EINLEITUNG | 14 |
| 1. Idee und Vorhaben | 16 |
| 2. Übersicht über die Untersuchungsaspekte der Studie | 17 |
| 2.1. Akustik – Wirkung von Stampflehm und Wellerlehm als Schallschutz | 17 |
| 2.2. Mögliche Bauweisen für Lärmschutzwände aus Lehm | 18 |
| 2.3. Herstellung, methodologische und technologische Aspekte | 18 |
| 2.3.1. Vorfabrikation von Bauelementen | 18 |
| 2.3.2. Alternativ: Laufende Vor-Ort-Herstellung | 18 |
| 2.4. Statik | 18 |
| 2.5. Ökologische und geographische Aspekte | 19 |
| 2.6. Kosten, Dauerhaftigkeit und andere ökonomische Aspekte | 19 |
| 3. Konzeption als Pilotvorhaben und Forschungsprojekt | 20 |
| TEIL I: PROJEKTIERUNG UND BAU | 21 |
| 4. Konzeptvorschlag: Lehmlärmschutzwand bei der geplanten Rastanlage Nebelin | 22 |
| 4.1. Ausgangssituation und Verhältnis zur Genehmigung der A14 | 22 |
| 4.1.1. Auswertung der Planfeststellungsunterlagen | 23 |
| 4.1.2. Umsetzung einer Lehmlärmschutzwand nach Planfeststellung | 23 |
| 5. Konstruktion | 25 |
| 5.1. Allgemeines | 25 |
| 5.2. Statisches System | 25 |
| 5.3. Lasten | 25 |
| 5.4. Geometrieentwicklung | 26 |
| 5.4.1. Schwerlastwand | 26 |
| 5.4.2. Trägerwand | 28 |
| 5.5. Gründung | 30 |
| 5.6. Lehmbaustatik | 30 |
| 5.7. Vordimensionierung | 33 |
| 5.7.1. Gründung Schwerlastwand | 33 |
| 5.7.2. Gründung Trägerwand | 33 |
| 5.7.3. Stahlstütze Trägerwand | 33 |
| 5.8. Druckfestigkeit | 33 |
| 5.8.1. Versuchsergebnisse | 34 |
| 6. Bauverfahren | 36 |
| 6.1. Verfahren Vorfertigung Stampflehmelemente | 36 |
| 6.2. Verfahren Stampflehm-Trägerwand | 40 |
| 6.3. Verfahren Stampflehm-Schwerlastwand | 41 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| 6.4. | Verfahren Wellerlehm-Schwerlastwand | 41 |
| 6.4.1. | Traditionelle Methode | 41 |
| 6.4.2. | Verfahrenstechnik zur Erstellung einer Lehmweller-Schallschutzwand | 42 |
| 6.4.2.1. | Laufende Vor-Ort-Produktion (mit 'wandernder' Verschalung) | 42 |
| 6.4.2.2. | Logistisch weiterentwickelte Methode mit vorgefertigten Elementen (vorzugsweise mittels Wellerlehmpresse) | 42 |
| 6.4.3. | Großtechnische Fabrikation Wellerlehm | 44 |
| 6.4.4. | Prozessparameter und Kinematikstudien für die Konzipierung einer Maschine zur Herstellung von Blöcken aus Wellerlehm | 46 |
| 6.4.5. | Erster Pilotversuch Wellerlehmpresse | 46 |
| 7. | Abdeckung | 49 |
| 7.1. | Variante Hybridwand: Stampflehm/Stahlträger | 49 |
| 7.2. | Variante Schwerlastwand (Stampflehm und Wellerlehm) | 50 |
| 7.3. | Photovoltaik | 50 |
| 8. | Erstellung einer Lehmprobewand in Nebelin | 51 |
| 8.1. | Zielstellung | 51 |
| 8.2. | Beschreibung | 51 |
| 8.2.1. | Herstellung und Einbau von gestampften Wellerlehmblöcken | 52 |
| 8.2.2. | Bau des Stampflehmabschnitts | 53 |
| 9. | Formgebung der Lehmlärmschutzwand | 55 |
| 9.1. | Statisch relevante Geometrie | 55 |
| 9.2. | Dedizierte Ausgestaltung der Lehmwand als Lebensraum | 56 |
| 9.2.1. | Innovationen im Hinblick auf die Ausgestaltung als Lebensraum | 56 |
| 10. | Dauerhaftigkeit | 61 |
| 10.1. | Beispiele für Erosion an historischen Wellerlehm-Gebäuden in Ostdeutschland | 62 |
| 10.2. | Projektierte Maßnahmen zur Erosionskontrolle | 63 |
| 10.2.1. | Schutzeinrichtungen, Zwischenbereich, Sammelrinne und Abfluss | 63 |
| 10.2.2. | Ergänzung der statisch erforderlichen Wandstärke | 63 |
| 10.2.3. | Bepflanzung mit Efeu auf der Fahrbahnseite | 64 |
| 10.2.4. | Oberfläche und kontrollierte Erosion durch Erosionsbremsen – Stampflehm | 64 |
| 10.2.5. | Oberfläche und kontrollierte Erosion – Wellerlehm | 68 |
| 10.2.6. | Wirkung von Spritzwasser, Tausalz und Schneeräumung | 69 |
| TEIL II: | LÄRMSCHUTZFUNKTION | 71 |
| 11. | Lärmschutz und Nachweise | 72 |
| 11.1. | Akustische Prüfungen an der TU Lübeck | 72 |
| 11.1.1. | Akustische Messungen | 72 |
| 11.1.1.1. | Messungen und Ergebnisse Wellerlehm | 73 |
| 11.1.1.2. | Messungen und Ergebnisse Stampflehm | 74 |
| 11.1.2. | Zusammenfassung und Bewertung | 79 |
| 11.1.2.1. | Plausibilität der Prüfungen und Ergebnisse | 79 |
| 11.1.2.2. | Vorläufiges Fazit | 80 |
| 11.2. | Bauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Schallabsorption | 81 |
| 11.2.1. | Stampflehm | 81 |
| 11.2.2. | Wellerlehm | 81 |

| | | |
|--|--|------------|
| 11.3. | Akustikmessungen der Bundesanstalt für Straßenwesen | 82 |
| 11.3.1. | Lehmlärmschutz – akustische Eigenschaften | 82 |
| 11.3.2. | Messmethode | 82 |
| 11.3.3. | Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Absorptionsfähigkeit | 83 |
| 11.3.4. | Messergebnisse | 83 |
| 11.3.5. | Reproduzierbarkeit, zukünftige Messungen | 85 |
| 11.3.6. | Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse, mechanische Stabilität | 85 |
| TEIL III: ÖKOLOGIE UND NACHHALTIGKEIT | | 87 |
| 12. | Ökologische Funktion als Lebensraum für spezialisierte Arten | 88 |
| 12.1. | Ökologisches Lebensraumpotenzial | 88 |
| 12.2. | Idee des „hochgeklappten“ Naturschutzes | 89 |
| 12.3. | Lehmbauwand als Lebensraum für spezialisierte Arten im regionalen Biotopverbund | 89 |
| 12.3.1. | Die Lärmschutzwand als Trittsteinbiotop im Ökosystem | 89 |
| 12.3.2. | Artenspektrum und Gefährdungsgrad | 90 |
| 12.3.3. | Darstellung der möglichen Besiedler mit Flugradien, Trachtpflanzen oder Beutetieren etc. | 93 |
| 12.3.4. | Ausstattungs-elemente der Lehmwand mit Naturschutz-Bauelementen | 94 |
| 12.3.4.1. | „Bienensteine“ | 95 |
| 12.3.4.2. | Einfügen von „Bienen/Vogellehm“ | 96 |
| 12.3.4.3. | Lochungen in Wellerlehm | 97 |
| 12.3.4.3. | Einfügen von weiterem Material (Schilfrohr) | 99 |
| 12.3.4.4. | Aussparungen für Fledermausarten (mit vorgesetzten sägerauen Lärchenbrettern) | 99 |
| 12.3.5. | Die Lehm-bauwand bietet zudem das Potenzial, weitere Nistmöglichkeiten für andere Tiergruppen zu integrieren, um das Lebensraumangebot im Untersuchungsgebiet für bedeutende Tiergruppen zu erhöhen. | 100 |
| 12.4. | Bewertung als Ausgleichsmaßnahme | 102 |
| 12.5. | Einbindung des Bauwerks in das Lebensraumnetzwerk der Umgebung (Autobahn A14 bei Nebelin) | 103 |
| 12.5.1. | Standorttypische Flora, Eignung als Futterpflanzen für Wildbienen, Entwicklungspotenzial | 105 |
| 12.5.2. | Schutzgebiete | 107 |
| 12.5.2.1. | Monitoringkonzept | 107 |
| 12.5.2.2. | Landschaftliche Einbindung | 107 |
| 12.5.3. | Anforderungen an stationäre Beleuchtungseinrichtungen | 108 |
| 13. | Nachhaltigkeit von Material und Bauweise | 109 |
| 13.1. | Bedeutung des Lehmbaus in der Region und europaweit | 109 |
| 13.2. | Lehmbau ohne Stabilisierung durch Zusätze | 110 |
| 13.3. | Nutzung örtlicher Lehmvorkommen aus dem Autobahnbau | 111 |
| 13.3.1. | Erhalt von Bodenfunktionen bei ausgebautem Bodenmaterial | 111 |
| 13.3.2. | Boden als Ressource sichtbar machen | 112 |
| TEIL IV: ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG | | 114 |
| 14. | Ökonomische Bilanz | 115 |
| 14.1. | Allgemeine Einschätzung | 115 |

| | |
|---|------------|
| 14.2. Baukosten | 116 |
| 14.2.1. Stampflehm-Trägerwand | 116 |
| 14.2.2. Stampflehm-Schwerlastwand | 117 |
| 14.2.3. Wellerlehm-Schwerlastwand | 118 |
| 14.3. LCA – Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus | 119 |
| 14.3.1. Beschreibung der 5 untersuchten Wandtypen | 120 |
| 14.3.2. Grundlagen und Annahmen der Berechnungen | 120 |
| 14.3.3. Rechenergebnisse | 121 |
| 14.3.4. Zwischenfazit Kosten und CO ₂ | 124 |
| 14.4. Wartungskosten | 128 |
| 14.5. Wirtschaftliche Bedeutung | 128 |
| 14.5.1. Grundinformationen | 128 |
| 14.5.2. Fazit | 130 |
| 14.5.3. Marktanalyse Lehmblöcke | 131 |
| TEIL V: BEWERTUNG DES PROJEKTS | 133 |
| 15. Prozess | 134 |
| 15.1. Partizipation | 134 |
| 15.2. Ingenieurskunst – Ein Seitenblick | 134 |
| 15.3. Die Rolle zeitgenössischer Kunst | 136 |
| 15.4. Lärmschutz ist Baukultur | 137 |
| 16. Abschließende Bewertung | 138 |
| 16.1. Bautechnik | 138 |
| 16.1.1. Entwicklung marktreifer Lehmbautechnik-Systeme für den Hochbau | 138 |
| 16.1.1.1. Druckfestigkeit bei Baumaterialien | 138 |
| 16.2. Fazit und Darstellung der Relevanz aus der Sicht des Biosphärenreservates Flusslandschaft Elbe | 139 |
| 17. Umsetzung der Projektidee | 141 |
| 17.1. Prototyp und Pilotvorhaben an der A14 in Nebelin | 141 |
| 17.2. Weiterführendes Konzept „Brandenburgs Alhambra“ | 141 |
| 17.2.1. Ideenfindungsworkshop | 142 |
| 17.2.2. Doppelnutzung für Natur und Mensch | 144 |
| 17.2.3. Multifunktionalität und Einbettung | 145 |
| 17.2.4. Architektur des Raststättengebäudes | 145 |
| 17.2.5. Zukunftsvision | 147 |
| 17.2.6. Nächste Schritte (geplante Folgeforschung) | 147 |
| ANHANG | 148 |
| Konstruktion / Vorabmessungen | 149 |
| Akustische Messungen | 188 |
| Technische Zeichnungen | 192 |
| Studie zur Vorfertigung von Wellerlehmelementen | 202 |
| Die Autor:innen und weitere Beteiligte | 227 |

Abbildungsverzeichnis

Anmerkung: Bei Abbildungen ohne Urheberangabe handelt es sich um Abbildungen, die von Mitgliedern des Autorenteam illustrierend für die Inhalte der vorliegenden Machbarkeitsstudie erstellt worden sind.

| | | |
|---------|---|----|
| Abb. 1 | Beispiel einer Stampflehmwand; hier Verfügen einer 11 m hohen Wand aus Stampflehmelementen; Herzog de Meuron/Martin Rauch | 16 |
| Abb. 2 | Wildbiene in Wellerlehmwand; Foto Christian Hansel | 19 |
| Abb. 3 | Skizze des Ideenkonzepts der Gesamtanlage Lehmlärmschutzwand A, E Schwerlastwände Wellerlehm, H. 5 m, mittlere Wandstärke: 120 cm, L. A ca. 1100, E ca. 1400 Meter B Stampflehmwand mit Stahlrammgründung, 7 m Höhe, Wandstärke: 45 cm, Länge 570 Meter C Schwerlastwand Stampflehm, 5 m Höhe, mittlere Wandstärke: 100 cm, Länge ca. 1300 Meter D Schwerlastwand Wellerlehm, 4 m Höhe, mittlere Wandstärke: 100 cm, Länge ca. 1500 Meter | 22 |
| Abb. 4 | Auszug aus Lageplan Blatt 14 | 23 |
| Abb. 5 | Flächeneinteilung freistehender Wände gem. DIN EN 1991-1-4, 7.4.1 Bild 7.19 | 26 |
| Abb. 6 | Ansicht der Schwerlastwand / überlappende Anordnung der Lehmelemente | 26 |
| Abb. 7 | Konstruktionsprinzipien für Schwerlastwände aus Stampflehm – Aufsicht Variante 1 (A) und Variante 2 (B), Schnitt I-I (C) | 27 |
| Abb. 8 | Bereichsweise Angabe der Querschnittsabmessung der Stampflehmelemente / Wandhöhe – Variante 1 | 28 |
| Abb. 9 | Bereichsweise Angabe der Querschnittsabmessung der Stampflehmelemente / Wandhöhe - Variante 2 ($\alpha=60\text{Grad}$) | 28 |
| Abb. 10 | Ansicht der Varianten zur Trägerwand | 29 |
| Abb. 11 | Schwerlastwand (links), Trägerwand (rechts). | 30 |
| Abb. 12 | Ausnutzung der Druckfestigkeit – Schwerlastwand Variante 1 (4.3.1), $h=7\text{m}$, $d=1,2\text{m}$. | 32 |
| Abb. 13 | Ausnutzung der Schubtragfähigkeit – Schwerlastwand Variante 1 (4.3.1), $h=7\text{m}$, $d=1,2\text{m}$. | 32 |
| Abb. 14 | Regelquerschnitt A14 | 33 |
| Abb. 15 | ERDEN Werkhalle – Produktionsstätte für vorgefertigte Stampflehmelemente; Foto © Hanno Mackowitz | 36 |
| Abb. 16 | Aufbereitung des lokalen Aushubmaterials zum Rohmaterial zur Herstellung von maschinell vorgefertigten Stampflehmelementen | 37 |
| Abb. 17 | „Roberta“ – Maschine zur Herstellung von vorgefertigten Stampflehmelementen; Foto © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH | 37 |
| Abb. 18 | Zuschnitt der vorgefertigten Stampflehmwand auf Elementlänge mittels Groß-Kreissäge. Foto © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH | 38 |
| Abb. 19 | „Feldfabrik“ in einer angemieteten Lagerhalle, maschinelle Vorfertigung von Stampflehmelementen; Foto © Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH | 38 |
| Abb. 20 | Trocknungsprozess der Stampflehmelemente in einem temporär eingerichteten Zelt | 39 |
| Abb. 21 | Versatz der vorgefertigten Stampflehmelemente mittels Baukran | 39 |
| Abb. 22 | Versetzte Stampflehmelemente – Retuschierarbeiten der sichtbaren Fugen noch ausständig | 40 |
| Abb. 23 | Fertiggestellte Stampflehm-Aussenfassade, Alnatura Campus Darmstadt | 40 |
| Abb. 24 | Skizze von Martin Rauch zum Prinzip des Arbeitsablaufs beim Bau einer Schwerlastwand in der Bauweise Stampflehm Vor-Ort-Produktion in wandernder Verschalung | 41 |
| Abb. 25 | Drei Videostandbilder, die das manuelle Begradigen von Wellerlehm durch 'Abstechen' mittels eines speziellen Abstechspatens zeigen (traditionelles Verfahren). | 43 |
| Abb. 26 | Prof. Heiner Lippe prüft noch nicht ausgeschalte Wellerlehmblöcke die im Rahmen des Baus der Probewand hergestellt worden und zwecks Akustikmessungen für den Weitertransport an die TH Lübeck vorgesehen sind. | 43 |
| Abb. 27 | Christian Hansel führt mit einer Motorsäge einen Sägerest von Wellerlehm durch. | 44 |

| | | |
|---------|--|----|
| Abb. 28 | Skizze zur Laufenden-Vor-Ort-Produktion einer Wellerlehmwand in großtechnischem Verfahren. (1) Die aus Lehm und Stroh gemischte Wellerlehmmasse wird mit Absetzcontainern auf die Baustelle geliefert. (2) Mittels Greifkran wird die Masse in die mobile Wellerblockfertigungsanlage gefüllt und zu großformatigen Blöcken gepresst. (3) Ein mobiler Kran mit speziell entwickelter Greifzange setzt die Blöcke abwechselnd auf das vorbereitete Fundament/die Wand und in eine Reihe parallel vor der Wand zum Trocknen. (4) Die bereits gefertigte Wand sowie die vofabrizierten Blöcke werden mit einem speziellen Wetterschutzsystem geschützt. (5) Angepasste Arbeitsbühnen ermöglichen fortlaufend die Kontrolle und Nachbearbeitung der Wandoberfläche. Eine horizontale Abdeckung wird auf der fertigen Wand montiert. Hierzu bieten sich u.a. Solarpaneele an. | 45 |
| Abb. 29 | Besichtigung einer existierenden fahrbaren Großpresse (in diesem Fall eine für Abfälle) durch Mitglieder unseres Teams zwecks Evaluierung des Funktionsprinzips und der Anwendbarkeit für Wellerlehm (Videostill) | 45 |
| Abb. 30 | Die "Presskammer", der Großpresse durch den Ausschubkanal gesehen (Videostill) | 46 |
| Abb. 31 | Ein Wellerlehmblock wird nach dem Kompaktierungsvorgang aus der Kammer herausgedrückt. | 47 |
| Abb. 32 | Ein fertiger Wellerlehmblock im Maßstab 1:4 zu den geplanten Dimensionen. Die Ungleichmäßigkeit der Materialdichte – wie im Bild zu erkennen – soll in der Endanwendung durch wesentlich höheren Druck ausgeglichen werden. | 47 |
| Abb. 33 | Trapezblech | 49 |
| Abb. 34 | Querschnitt-Darstellung der Abdeckungsbefestigung in der Hybrid-Variante Stampflehm/Stahlprofile | 49 |
| Abb. 35 | Isometrische Darstellung der Abdeckungsbefestigung in der Variante Schwerlastwand (Stampflehm/Wellerlehm). Im Fall der Wellerlehmwand von 5 m Höhe beträgt die Wandstärke zur Bauzeit 120 cm, im Fall der Schwerlast-Stampflehmwand 100 cm. | 50 |
| Abb. 36 | Die Präsentation und Einweihung der Probewand am 5. Juni 2020. V.l.n.r.: Matthias Behrendt, Ortsvorsteher von Nebelin; Ute Reeh, Zentrum für Peripherie; Prof. Heiner Lippe, TH Lübeck. An der Probewand links der Stampflehmteil mit integrierten 'Bienensteinen' und an zwei Stellen 'Bienenlehm'; rechts der Wellerlehmteil mit integrierten 'Bienenlehm'-Elementen. | 51 |
| Abb. 37 | Aufbau des Wellerlehmabschnitts der Probewand aus vorgefertigten Blöcken. Links im Bild eine Verschalung zur manuellen Herstellung vorgefertigter Wellerlehmblöcke. Rechts im Bild die Lehmbauer Christian Hansel und Henry Krüger im Gespräch, hinten Burghardt Behrendt aus Nebelin (Videostandbild). | 52 |
| Abb. 38 | Mischen von Wellerlehm-Masse mit einem Radlader im Kieswerk (Videostandbild) | 52 |
| Abb. 39 | Stampfen einer neuen Schicht Stampflehm in der Verschalung mittels pneumatischer Verdichtern (Videostill) | 53 |
| Abb. 40 | Stampfen mittels eines pneumatischen Stampfers. Links im Bild ist der Anschluss zum Wellerlehmabschnitt der Testwand zu sehen (Videostill). | 54 |
| Abb. 41 | Die fertige Probewand; im Vordergrund der Stampflehmabschnitt mit Schichten von gelochten 'Bienensteinen' aus gebranntem Ton, die gleichzeitig auch als 'Erosionsbremsen' gegen herablaufendes Regenwasser dienen. | 54 |
| Abb. 42 | Entwurf von Ute Reeh für die jeweiligen Enden einer Schwerlast-Lehmlärmschutzwand | 55 |
| Abb. 43 | Dreidimensionale schematische Darstellung der Formgebung am Ende einer Schwerlastwand aus Stampflehm. Diese Formgebung ist statisch, akustisch, ökologisch und ästhetisch wirksam. | 55 |
| Abb. 44 | Vom Team so genannte "Bienensteine" aus schwach gebranntem Ton im Stampflehmsegment der Testwand in Nebelin. Die Bienensteine im Bild sind von Kindern aus der Umgebung hergestellt worden. | 57 |
| Abb. 45 | Detailansicht von durch Kinder gestaltete "Bienensteine" für nichtgrabende Wildbienen | 57 |
| Abb. 46 | Schematische Darstellung einer Stampflehm-Schwerlastwand in Schnittansicht. Auf der Autobah-abgewandten Seite (rechts) mit integrierten Elementen aus unarmiertem Lehm (a, b) und mit integrierten 'Bienensteinen' aus gebranntem Ton (c), die gleichzeitig auch vor Erosion durch herablaufendes Wasser schützen. Auf der Autobahnseite (links) sind übereinander Trasskalk-Einschlüsse als Erosionsbremsen vorgesehen. | 58 |
| Abb. 47 | Das Foto zeigt einen Ausschnitt des Wellerlehmabschnitts der Testwand in Nebelin. Die schmalen, integrierten Elemente aus unarmiertem, nur schwach kompaktiertem Naturlehm sind gut zu erkennen. Zur Zeit der Aufnahme waren diese 'Bienenlehm'-Elemente noch nicht durchgetrocknet und die Wand noch nicht durch Abfräsen egalisiert. | 58 |
| Abb. 48 | Videostill eines Materialversuchs von Christian Hansel. Unter der Abdeckung einer Wellerlehmwand angebrachte Schilfrohrstücke werden von bestimmten Wildbienen offenbar intensiv genutzt. Allein auf diesem Ausschnitt sind 9 Bienen zu erkennen: 6 im Flug und 3 in Löchern. | 59 |
| Abb. 49 | Querschnittsdarstellung der vorgesehenen Fledermausnischen in einer Wellerlehm-Schwerlastwand | 60 |
| Abb. 50 | Konstruktionsskizze Nisthilfe Fledermauskästen. Isometrische Schnittdarstellung; Detail des oberen Teils einer Wellerlehmwand | 60 |
| Abb. 51 | Rackwitz (Sachsen), Leipziger Str.1; Alter ca. 130 Jahre, Dicke: 80 cm, Staßenabstand : 2-3 m, Höhe mit Sockel: 4,50 m, Substanzverlust: ca. 5 cm | 62 |
| Abb. 52 | Mocherwitz (Sachsen), Lindenstr.; Straßenabstand: 20 m , Höhe: 4,0 m | 62 |

| | | |
|---------|---|-----|
| Abb. 53 | Schnittdarstellung eines möglichen Entwässerungssystems; hier im Fall der Variante Trägerwand. | 63 |
| Abb. 54 | Darstellung der Abwitterung einer Stampflehmwandoberfläche. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch | 65 |
| Abb. 55 | Schnittdarstellung der Integration einer Erosionsbremse in Stampflehm während des schichtweisen Aufbaus in der Verschalung. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch | 66 |
| Abb. 56 | Um die Erosion zu kontrollieren, werden Hindernisse für das herunterlaufende Regenwasser eingebaut. ‚Erosionsbremsen‘ aus eingestampftem Trasskalk mit fortschreitender Erosion (Schnittdarstellung). Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch | 66 |
| Abb. 57 | Die dem Wetter exponierte Fassade des Haus Rauch kurz nach Fertigstellung 2008. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch | 67 |
| Abb. 58 | Fassade des Haus Rauch 2010 nach zwei Jahren Erosion. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch | 67 |
| Abb. 59 | Geschalte Wellerlehmoberfläche nach einem Jahr. Die Wandstärkenzugabe im Vergleich zum Sockel berücksichtigt die vorhersehbare Abwitterung. Foto Christian Hansel | 68 |
| Abb. 60 | Abgestochene Wellerlehmoberfläche auf der Wetterseite nach zwei Jahren. Foto Christian Hansel | 69 |
| Abb. 61 | Lärmschutzwand mit vorgelagerter Schutzeinrichtung (Betonschutzwand) bei beengten Platzverhältnissen an der BAB A1; im Zwischenraum Schneereste vom Winterdienst. Foto BAST | 70 |
| Abb. 62 | Testreihe 1: Manuelles Trennen eines Wellerlehmblocks aus der Prignitz. Foto Heiner Lippe | 75 |
| Abb. 63 | Testreihe 1, Versuchsaufbau: die Unebenheiten, die Texturen sind gut zu erkennen. Foto Heiner Lippe | 75 |
| Abb. 64 | Testreihe 2: Verfüllen der Oberflächenfugen auf der Testfläche aus vorheriger Testreihe 01. Foto Heiner Lippe | 76 |
| Abb. 65 | Testreihe 2: Oberfläche der Testfläche nach Begradigung und Verfüllung. Foto Heiner Lippe | 76 |
| Abb. 66 | Testreihe 3: Detail des Ausgangsmaterials. Foto Heiner Lippe | 77 |
| Abb. 67 | Testreihe 3: Detailbild der Oberfläche des manuell gestampften Materials. Foto Heiner Lippe | 77 |
| Abb. 68 | Testreihe 4: Detailbild vor Entfernen aus dem Hallraum. Foto Heiner Lippe | 78 |
| Abb. 69 | Testreihe 4: partielle Austrocknung, Versuchsaufbau vor den Messungen. Foto Heiner Lippe | 78 |
| Abb. 70 | Eine noch nicht vorerodierte Hackschnitzel-Lehm-Oberfläche. Foto Martin Rauch | 81 |
| Abb. 71 | Beispiel: Für die absorbierende(n) Seite(n) werden ca. 10 cm Holz-Hackschnitzel-Lehmgemisch zwischen Trasskalklagen eingestampft. Die Wände werden vorerodiert; übrig bleibt eine stark zerklüftete Oberfläche. Skizze Martin Rauch | 81 |
| Abb. 72 | Die gepressten Wellerlehmblöcke werden mit einer Fräse ca. 10 cm tief eingefräst. Die Wand wird vorerodiert. Übrig bleibt eine stark zerklüftete Oberfläche. Skizzen Martin Rauch | 81 |
| Abb. 73 | Vom Verkehrslärm wird ein Teil an der Wand reflektiert, ein Teil geht in die Wand hinein. Davon wird wiederum ein Teil in der Wand absorbiert. Was nicht absorbiert wird, tritt als transmittierte Energie auf der anderen Seite wieder aus. Das Verhältnis zwischen transmittierter Energie und auftreffender Energie ist das Maß für die <i>Schalldämmung</i> einer Wand. Das Verhältnis zwischen auftreffender Energie und reflektierter Energie ist das Maß für die <i>Schallabsorption</i> . | 82 |
| Abb. 74 | Messung mittels Impedanzmessrohr. Foto BAST | 82 |
| Abb. 75 | Foto, das die vielversprechendsten Probekörper zeigt. Links der Lehmschlicker mit Schilfhalmen, in der Mitte Stampflehm mit der HWL-Platte (Holzwolle/Magnesit) und rechts ein Stück des Hanfkalk-Probekörpers. Fotos BAST | 83 |
| Abb. 76 | Diagramm Schallabsorptionsmessung Proben Wellerlehmoberfläche (violett), Lehm mit senkrecht zur Oberfläche integrierten Schilfhalmen (blau), Stampflehm mit integrierter HWL-Platte. Grafik BAST | 84 |
| Abb. 77 | Hanfalkprobe. Foto BAST | 84 |
| Abb. 78 | Diagramm der Schallmessungen mit Hanfkalkproben unterschiedlicher Höhe. Grafik BAST | 85 |
| Abb. 79 | Rostrote Mauerbiene (<i>Osmia bicornis</i>), zwei Zeichnungen von Schülern der Montessori-Schule Wittenberge | 96 |
| Abb. 80 | Schornsteinwespe; Foto Christian Hansel | 97 |
| Abb. 81 | Detailaufnahme vom 28. Juli 2020 des Wellerlehnteils der Probewand in Nebelin mit Insektenbauten. Foto Dieter Günnewig. | 98 |
| Abb. 82 | Zwergfledermaus; Zeichnung von Martin Ryll, Montessori-Schule Wittenberge | 99 |
| Abb. 83 | Ausschnitt der Maßnahmenpläne 3 und 4 im Bereich der Lärmschutzwand und der Rastanlage (aus DEGES, Planfeststellungsantrag). Dunkelgrün: Gehölzsaum, Hellgrün: Wiese. | 104 |
| Abb. 84 | Plan der Rastanlage bei Nebelin mit eingezeichnetem Verlauf des von uns konzipierten Lärmschutzes (rote Linien): zwischen Fahrbahn und Raststätte Stampflehm 5 m hoch; außen um die Raststätte Wellerlehm 4 m hoch. Für den Naturschutz relevante Flächen: A – vom Dorf aus zugängliche Bereiche B – unzugängliche (sich z.B. durch die Geländesteigung selbst schützende) Bereiche C – der von der Raststätte aus zugängliche Bereich D – menschenfreier Bereich | 105 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Abb. 85 | Abgrenzung des LSG im Ausschnitt des Übersichtsplageplans (Unterlage 3, Blatt-Nr. 1). | 107 |
| Abb. 86 | Weltweites Vorkommen von Lehm, Karte: CRATerre/ENSAG | 109 |
| Abb. 87 | Karte mit der historischen Verbreitung des Lehmbaus in Europa (" Map of Earthen Heritage in the European Union" (Ausschnitt); Autoren: Mariana Correia, Letizia Pasquale and Saverio Mecca. Auf der Karte sind vier Lehmbautechniken gekennzeichnet: Fachwerkbau mit Lehm, Lehmziegel, Stampflehm (auf der Karte gelblich markiert) und Wellerlehm (auf der Karte dunkelbraun markiert). Karte: Terra Incognita | 109 |
| Abb. 88 | Abbildung aus: DIN EN 15805:2020-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken: unterschiedliche Betrachtungsszenarien | 121 |
| Abb. 89 | Herstellungsphase A | 125 |
| Abb. 90 | Entsorgungsphase C | 126 |
| Abb. 91 | Summe A-C | 126 |
| Abb. 92 | Recyclingphase D | 127 |
| Abb. 93 | Vergleichende Gesamtbilanz | 127 |
| Abb. 94 | Verwendete Baustoffe für fertiggestellte Wohngebäude 2019 (Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis)) | 129 |
| Abb. 95 | „Alhambra planen“; Zeichnung von Ute Reeh, 2020 | 134 |
| Abb. 96 | Soziale Struktur und unverbundener Raum; Zeichnung von Ute Reeh, 2020 | 136 |
| Abb. 97 | Anwendungsbereiche für Materialfestigkeiten: (A) Hochleistungskonstruktionen (z. B. Talsperren, Tunnel), (B) Mittel- und hochbelastete Konstruktionen (z. B. Brücken), (C) Wenig belastete Konstruktionen (z. B. Hallen, Lärmschutz). Skizze Max Dombrowski, TU Berlin, Fachgebiet Massivbau | 139 |
| Abb. 98 | Bildmontage, die den Verlauf der Autobahn A14 und der Raststätte auf einer Luftaufnahme zeigt. Rot: Lehmwände, die in das Raststättengebäude übergehen. Orange: Leitstrukturen für Menschen. Ocker: Fahrrad- und Fußweg. | 142 |
| Abb. 99 | Von Links, Maria Pegelow, Brandenburgische Architektenkammer; Julian Latzko, Bundesstiftung Baukultur; Lennart Beckebantze, Universität Hannover; Dr. Dieter Günnewig, Bosch&Partner Hannover; Andreas Hagenguth, Fledermausexperte, Berge. Foto Ute Reeh | 143 |
| Abb. 100 | Vorschläge für Bänke als Leitstruktur für Menschen auf dem Verbindungsweg zwischen Nebelin und der Lehmlärmschutzwand. Foto Ute Reeh | 144 |
| Abb. 101 | Die Landschaft zwischen der Raststätte und dem Dorf Nebelin. Videostandbild, Drohne Fabian Laute | 144 |
| Abb. 102 | Ideenskizze des Architekten Martin Haas für das Raststättengebäude | 146 |
| Abb. 103 | Ideenskizze des Architekten Martin Haas zum Grundriss und der Funktionalität des Raststättengebäudes | 146 |
| Abb. 104 | Skizze des Architekten Martin Haas für das Raststättengebäude, Ansicht von Westen | 146 |
| Abb. 105 | Schnittzeichnung des südlichen Raststättengebäudes des Lehmabauensembles mit Gastraum, Seminar/ Tagungsraum (1. Stock), begehbare Dach/Aussichtsplattform, Außenterrasse. Zeichnung haas cook zemmrich STUDIO2050 | 146 |
| ANHANG | | |
| Abb. A1 | Querschnitt Trägerwandsystem | 192 |
| Abb. A2 | Längsschnitt Trägerwand, Detail Gründung | 193 |
| Abb. A3 | Längsschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung | 194 |
| Abb. A4 | Querschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung | 195 |
| Abb. A5 | Querschnitt Trägerwand; Detail Abdeckung | 196 |
| Abb. A6 | Horizontalschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung | 197 |
| Abb. A7 | Querschnitt Stampflehm-Schwerlastwand mit betonsparender Gründung | 198 |
| Abb. A8 | Querschnitt Stampflehm-Schwerlastwand, alternative Gründung | 199 |
| Abb. A9 | Querschnitt Wellerlehm-Schwerlastwand | 200 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabelle 1 | Auszug Lärmschutzwand 11, technische Angaben (Unterlage 1 Erläuterungsbericht, S. 143) | 23 |
| Tabelle 2 | Druckfestigkeit von Lehm aus dem Kieswerk bei Nebelin; Würfel 15 cm ³ | 34 |
| Tabelle 3 | Druckfestigkeit von Lehm aus dem Kieswerk bei Nebelin; Würfel 20 cm ³ | 34 |
| Tabelle 4 | Nebeliner Lehm | 48 |
| Tabelle 5 | Recyclinglehm aus Thüringen aus dem Jahr 1711 | 48 |
| Tabelle 6 | Absorptionsgruppen; Quelle: ZTV-Lsw-06 | 79 |
| Tabelle 7 | Lärmschutzanlagen | 79 |
| Tabelle 9 | Kostenschätzung Bauabschnitt B; Kostenschätzung Stand September 2020 | 116 |
| Tabelle 10 | Kostenschätzung Bauabschnitt C; Kostenschätzung Stand September 2020 | 117 |
| Tabelle 11 | Kostenschätzung Bauabschnitte A und E; Kostenschätzung Stand September 2020 | 118 |
| Tabelle 12 | Kostenschätzung Bauabschnitt D; Kostenschätzung Stand September 2020 | 119 |
| Tabelle 13 | Rechenergebnisse Typ 01 | 122 |
| Tabelle 14 | Rechenergebnisse Typ 02 | 122 |
| Tabelle 15 | Rechenergebnisse Typ 03 | 123 |
| Tabelle 16 | Rechenergebnisse Typ 04 | 123 |
| Tabelle 17 | Rechenergebnisse Typ 05 | 124 |
| Tabelle 18 | Synopsis aus Emission und CO ₂ -Bepreisung, auch fiktiv; grobe Wertung in der Tabelle betrifft die Reigenfolge, dh. : 1 bedeutet geringster Kostenwert, 5 höchster Kostenwert. | 124 |
| Tabelle 19 | Verwendete Baustoffe für den Nichtwohnbau (Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021) | 129 |

Zusammenfassung

Die vorliegende Machbarkeitsstudie untersucht Möglichkeiten und verschiedene Aspekte im Hinblick darauf, Lehm- und Stampflehm für eine Lärmschutzlösung an der Bundesautobahn A14 auf Höhe des Dorfes Nebelin anzuwenden. Der angestrebte Zweck des Lehm- und Stampflehm-Lärmschutzes – als Alternative zu konventionellem Lärmschutzbau – ist, die Auswirkungen des Autobahnbaus im ökologischen, landschafts- und menschenfreundlichen Sinne abzumildern.

Ausgangspunkt war einerseits die Notwendigkeit des Lärmschutzes für Nebelin, und andererseits die Idee zur Einbindung von Potenzialen der strukturschwachen Region – unter anderem traditionellem Knowhow im Lehm- und Stampflehm-Bau – sowie die Erkenntnis, dass Lehm- und Stampflehm-Bau zu naturfreundlicher und im Sinne des Klimaschutzes energiesparender, unter Umständen sogar kohlenstoffbindender Bauweise führt.

Die Machbarkeitsstudie hat als Gesamtziel verfolgt, zu untersuchen, ob Lehm- und Stampflehm-Bau in modernisierter und rationalisierter Form für den Bau einer Lärmschutzwand entlang der Autobahn bei Nebelin möglich und funktional wirksam ist, inwiefern eine solche Bauweise positive ökologische Auswirkungen hätte, und einen Kostenrahmen dafür zu ermitteln.

Da es sich bautechnisch bei Lehm- und Stampflehm-Bau in Bezug auf Lärmschutz um völliges Neuland handelt, ergab sich die Notwendigkeit, Lehm- und Stampflehm-Bau für großtechnische Anwendbarkeit zu rationalisieren. Folglich mussten Möglichkeiten zur technologischen Modernisierung erforscht und getestet werden. Es mussten ökonomische Aspekte und Kostenermittlung zu unterschiedlichen Varianten von Bauweisen und Konfigurationsmöglichkeiten ermittelt werden. Bezüglich der ökologischen Aspekte wurden neben Untersuchungen zum ökologischen Ausgleich, geographischen und artenspezifischen wissenschaftlichen Untersuchungen auch eigens für Lehm- und Stampflehm-Lärmschutzwände im betreffenden Umweltkontext bauliche Maßnahmen entwickelt, um seltene und geschützte Wildbienen und Fledermäuse zu fördern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl Wellerlehm als auch Stampflehm als Material für Lärmschutzwände geeignet sind und im Sinne der Nachhaltigkeit und Klima„freundlichkeit“ Vorteile gegenüber konventionellen Lärmschutzwänden haben. Aufgrund der fehlenden Erfahrungen bestehen jedoch einige Unsicherheiten. So sind für bestimmte Teilaspekte adäquate Lösungen gefunden worden, die jedoch weiter erforscht werden müssen. Dies gilt insbesondere für die Aspekte Schallabsorption und Tausalzbeständigkeit.

Insgesamt hat sich das Projekt aufgrund der notwendigen, speziell entwickelten Neuerungen und des im Projektverlauf zunehmenden Interesses sowohl im technisch-wissenschaftlichen Bereich als auch der Politik über den ursprünglich anvisierten Rahmen ausgeweitet. Wir haben somit versucht, sowohl die Kernfragen der Studie zu adressieren und zu beantworten, als auch weiterführende Perspektiven aufzuzeigen, wie zum Beispiel Potenziale von Lehm als Baumaterial dahingehend auszuloten, inwiefern es Baumaterialien mit ungünstiger CO₂- bzw. Energiebilanz ersetzen oder ergänzen kann.

Einleitung

Die vorliegende Studie ist das Ergebnis eines Prozesses, der mit der Auslegung und Erläuterung der Planfeststellungsunterlagen für die A14 im März 2019 im Dorf Nebelin begann.

Lärmpegelmessungen haben den Bewohner*innen bewusst gemacht, dass der bislang gelegentliche Lärm durch die ICE Strecke, ergänzt durch die neue A14 mit einer Raststätte zu massiven Veränderungen führen würde. Diese bedeuten einen Verlust von Lebensqualität, einen Wertverlust von Immobilien und bei denjenigen, deren Einkommen unter anderem auf sanftem Tourismus basiert, ein Einbrechen dieser Einkünfte. Während die durch vorbeifahrende Züge verursachten Geräusche nur punktuell / sporadisch auftreten und somit erträglich sind, wird die Autobahn einen weitgehend konstanten Lärmpegel verursachen, der zusammen über den gesetzlich vorgeschriebenen Normen liegt. Die momentane Gesetzeslage geht von fiktiv berechneten Werten aus. Ausnahmen stellen Situationen, wie die in Nebelin dar, bei denen sich der Lärm addiert.

Neben einer Einwendung des Dorfes, einer Sammlung von Unterschriften, einer Forderung nach verbessertem Lärmschutz und der Gründung einer Bürgerinitiative, übernahm das Zentrum für Peripherie eine wichtige Funktion. Seinem Grundsatz entsprechend, nahm es die sich abzeichnenden Probleme als Herausforderung für einen konstruktiven Vorschlag. Es schlug vor, besondere Potenziale der Region zu nutzen. Ziel war deren besondere Schönheit und Lebensqualität zu bewahren und die Situation für eine zukunftsweisende und wirtschaftlich relevante Entwicklung zu nutzen.

Die massive Beeinträchtigung der Schönheit und Ruhe von Dorf und Landschaft, das sich unmittelbar anschließende Landschaftsschutzgebiet, der Flächenverbrauch der Autobahn und die auf der Höhe des Dorfes geplante Raststätte wurden zum Anlass, einen innovativen Lärmschutz aus Lehm zu entwickeln, der sich in die Landschaft einfügt und als Prototyp dient, und der darüber hinaus als Leuchtturmprojekt für die Verbindung von Wirtschaft und Naturschutz steht.

Bereits die Analyse der Region im Rahmen des Wettbewerbs Zukunftsstadt 2015/16¹ hatte die Lehmbautradition der Prignitz als zukunftsweisende Ressource hervor gehoben. Trotz dessen unschlagbarer Nachhaltigkeit wurde der Lehm im 20. Jahrhundert verdrängt. „Die Vorurteile gegenüber dem Lehm sitzen tief und sind weitverbreitet.“² Eine technologische Weiterentwicklung in diesem Bereich könnte Bauen nachhaltig und klimafreundlicher machen. Damit stand fest, dass wir die Besten ihres Fachs als Partner*innen für die Idee und damit für die Region gewinnen müssen.

Es freut uns sehr, dass dies gelungen ist und wir diesen Vorabzug der Konzeptentwicklung vorstellen können. Zur Ausarbeitung einiger Themen werden wir den Zeitraum bis Ende 2020, für weitere Darstellungen bis Mitte 2021 benötigen.

Partner*innen des Entwicklungsteams sind:

Dr. Dieter Günnewig, Bosch & Partner GmbH, (Bewertung als ökologische Ausgleichsmaßnahme);
Dr.-Ing. Jan Mittelstädt, Knippers Helbig GmbH, (Tragwerksbau, Statik);
Martin Rauch, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Mag. (Stampflehm);
Christian Hansel, Lehm Bau Lovis UG, (Wellerlehm);
M. Sc. Anika Kristin Gathof, Institut für Ökologie, TU Berlin, (Lebensraum Wildbienen);
Prof. Arch. DPLG CEAA Heiner Lippe, TH Lübeck, (Tests und Analysen),
Ute Reeh, Zentrum für Peripherie, (Prozess und Form).

Es freut uns zeigen zu können, zu welchen guten Ergebnissen unser Arbeitsprinzip, Innovationen in der unmittelbaren Arbeit vor Ort, zusammen mit den Gemeinden, Kindern, Jugendlichen und regionalen Expert*innen zusammen mit Wissenschaftler*innen und Fachleuten von weiter her führt.

¹ Das Zentrum für Peripherie initiierte und begleitete den Wettbewerb.

² Martin Rauch, Clemens Quirin, Massiv und belastbar, DU, 887 | Oktober 2018

Danken möchten wir den Kindern und Jugendlichen, Lehrer*innen und Erzieher*innen der Montessorischule Wittenberge, der Albert Schweitzer Schule Wittenberge, der Grundschule Lanz, der Grundschule Karstädt, der Kita Nebelin und der Kita Karstädt.

Weiterhin möchten wir uns beim Ortsbeirat Nebelin, bei Matthias und Burghard Behrendt, Mai-ka Scheffer, Uli Petrascheck, Michael Bretag, der Bürgerinitiative Nebelin, Henry Krüger, Steffen Schmelzer und den PS Kieswerken, BRAAS Karstädt, Kay Hoffmann, der Firma Europress, Klaus Staeck und der Gemeinde Karstädt, Anja Noll, der LAG Storchenland Prignitz bedanken.

Als Test für die Verfahrenstechnik aller drei von uns genutzten Lehmbauvarianten, sowie als Anschauungsobjekt für die Anwohner*innen aus Nebelin und Karstädt, für das Infrastrukturministerium Brandenburg, das Bundesverkehrsministerium, die Bundesanstalt für Straßenbau (BASt) und der Autobahngesellschaft haben wir in Nebelin eine 8 Meter lange und 2,3 Meter hohe Probewand errichtet und am 5. Juni 2020 eröffnet. Es freut es uns sehr, dass wir in diesem Zusammenhang die Bundesanstalt für Straßenbau als wissenschaftliche Begleiterin und die Baukulturinitiative Brandenburg (Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung, Abteilung 2 - Stadtentwicklung, Brandenburgische Architektenkammer, Brandenburgische Ingenieurkammer, unterstützt von der Bundesstiftung Baukultur) als Befürworterin des Projektes gewinnen konnten. Es kann ein Best Practice Beispiel für die Baukultur in Brandenburg und bundesweit werden, das in vielerlei Hinsicht dazu beiträgt, eine qualitativ lebenswertere Umwelt im Land Brandenburg zu schaffen. Ebenfalls seit diesem Datum unterstützt das UNESCO-Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe – Brandenburg unser Projekt.

Die Konzeptentwicklung von Lehmlärmschutz als vertikale Ausgleichsmaßnahme wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und dem Umweltministerium und Wirtschaftsministerium Brandenburg gefördert. Im Namen des Teams und der Region danken wir für das entgegengebrachte Vertrauen.

2. **Übersicht über die Untersuchungsaspekte der Studie**

Untersucht haben wir die Oberflächen, Dicken und Wirkungen der Wand und deren Schallschutzwerte für die beiden Lehmbauweisen Stampflehm und Wellerlehm. Die von der Bundesanstalt für Straßenbau (BASt) übernommenen Messungen und deren Auswertung stehen noch aus. Sie werden fortgeführt, sobald die derzeitigen Einschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie wieder gelockert sind.

Im Rahmen der Studie haben wir Wandsysteme aus Massivlehm in den Bauweisen Stampflehm und Wellerlehm entwickelt, geplant und das Tragwerk rechnerisch nachgewiesen, sowie die beschriebenen Bautechniken hinsichtlich kosten- und materialsparender Varianten untersucht.

Zur Materialprüfung haben wir eine Musterwand gebaut. Diese Testwand vereint zwei Lehmbautechniken – Stampflehm und Wellerlehm – und integriert Elemente, die für die Besiedlung durch Insekten vorgesehen sind: Tonelemente mit Löchern (die gleichzeitig auch die Funktion von Erosionsbremsen erfüllen, von uns 'Bienensteine' genannt), sowie Komponenten aus unarmiertem Lehm (von uns 'Bienenlehm' genannt).

Für eine Umsetzung wird eine bauaufsichtliche Zulassung/Zustimmung im Einzelfall mit dem BMVI Referat StB13 abzustimmen sein. Diese haben wir, so weit wie es im Rahmen der Studie möglich war, vorbereitet.

Die Bau- und Unterhaltungskosten haben wir ermittelt, sowie in der abschließende Bewertung der Schallschutzwand Aspekte des Landschafts- und Naturschutzes berücksichtigt. Die Dauerhaftigkeit ist durch Vergleich mit vorhandenen Bauten erläutert. Der Rückbau ist bei der Kostenberechnung mit berücksichtigt.

Im Rahmen der maschinellen Fertigung zeigen wir Perspektiven unserer Entwicklungen für den Hochbau auf.

Wir geben einen Ausblick auf die zu erwartenden Wirkungen auf die Landschaft, die Biodiversität und die ökonomischen Rückkopplungswirkungen auf die Region.

Gemeinsam mit der Initiative Baukultur Brandenburg und der Bundesstiftung Baukultur ist der baukulturelle Wert dargestellt. Als Metapher und Ausblick ist ein Prototyp „Alhambra Brandenburg“ dargestellt.

2.1. **Akustik – Wirkung von Stampflehm und Wellerlehm als Schallschutz**

An der TH Lübeck sind Testreihen nach DIN 4109 Testreihen gemäß den Vorgaben der DIN 1793 Teil1 durchgeführt worden, um eine erste Einordnung der Eigenschaften von Lehmoberflächen zu erhalten. Um eine Zertifizierung im Rahmen eines Marktzulassungsverfahrens vorzubereiten, wird die BASt weitere Tests durchführen.

Die Messungen der TH Lübeck umfassen den Absorptionsgrad von Wellerlehm- (mit Fugenbild, mit geschlossenem Fugenbild) und Stampflehmoberflächen (erdfeucht, nach 8 Tagen Trocknung).

Seit Sommer 2020 hat die Bundesanstalt für Straßenwesen BASt den Aspekt Akustikprüfungen für Wellerlehm- und Stampflehm-Schallschutz übernommen.

Bei der Gesamtwirkung der projizierten Bauwerke spielen weitere Faktoren eine Rolle, wie jeweilige Masse und Höhe der Wand, Oberflächentextur (die im Lauf der Zeit rauer wird und somit die Schallreflexion reduziert), sowie die Form des Bauwerks.

2.2. Mögliche Bauweisen für Lärmschutzwände aus Lehm

Da mehrere Lehm-Bauweisen für eine Lehm-Lärmschutzwand in Frage kommen, haben wir im Wesentlichen zwei Grundtypen – Wellerlehm-Bauweise und Stampflehm-Bauweise – untersucht und in konkreten Anwendungsvarianten geplant und getestet.

Für beide untersuchten Lehm-Bauverfahren haben wir einerseits die Bauweise als Schwerlastwand entwickelt. Für die Stampflehm-Bauweise haben wir zudem eine wesentlich schlankere Hybrid-Bauweise mit Stahlprofilgründung zur Stabilisierung entwickelt.

2.3. Herstellung, methodologische und technologische Aspekte

Die beiden untersuchten grundsätzlichen Baumethoden sind (a) eine laufende Vor-Ort-Produktion in einer "wandernden" Verschalung und progressivem Aufbau – und (b) Produktion und Bau mittels vorgefertigter Bauelemente (große Lehmblöcke). Detaillierte Angaben zu den Produktionsverfahren sind unter „6. Bauverfahren“ auf Seite 36 aufgeführt.

2.3.1. Vorfabrikation von Bauelementen

Diese Produktionsmethode ist sowohl für Weller- als auch für Stampflehm geeignet. Dabei stellt unsere Entwicklung und Erprobung der Vorfabrikation von Wellerlehmblöcken als Bauelemente eine Innovation dar, da Wellerlehm herkömmlicherweise manuell in Verschalung direkt vor Ort aufgebaut wird.

Vorfabrikation sollte zum Beispiel lokal in einer temporär aufgestellten Feldfabrik stattfinden. Da die Stampflehmwände im Gegensatz zum Wellerlehm nur mit ca. 16-18 % Feuchtigkeit gefertigt werden, ist dessen Trockenprozess wesentlich kürzer.

2.3.2. Alternativ: Laufende Vor-Ort-Herstellung

Unserer Ansicht nach eignet sich die Laufende-Vor-Ort-Herstellung wegen des Bauumfangs einer Lärmschutzwand insbesondere für Stampflehm. Dabei wird die Verschalung progressiv vorgeschoben, Lehm in Schichten eingefüllt und verdichtet.

Die Herausforderungen sind vor allem logistischer Art, da es eine z.B. 500 Meter lange Baustelle sein wird. Wetterschutz ist erforderlich und der Winter kann i.d.R. nicht genutzt werden. Das Material soll entweder mit Kran oder besser mit fahrbarem Förderband in die Schalung gefüllt werden. Vibrationswalzen verdichten selbstfahrend in der Schalung lagenförmig die Stampfschichten.

Bei 7 Metern werden drei Stampflehmätze, bei 5 Metern zwei Stampflehmätze übereinander gesetzt. Zwischen den Stampfsätzen ist eine Trocknungszeit einzuplanen. Ein Zickzack-Grundriss am Anfang und am Ende erhöht die Stabilität, ermöglicht eine Reduktion der Materialmasse und verbessert die Bedingungen für ökologische Vielfalt (unterschiedliche Sonneneinstrahlung und Windbedingungen).

2.4. Statik

Auf den unter 2.2 aufgeführten Bauweisen basierend, haben wir verschiedene konkrete Varianten projiziert und berechnet, bzw. gemessen. Die untersuchten Aspekte umfassen:

- Fundamentierung (vertikale und horizontale Last)
- Seitliche Kräfte (Wind, Fahrzeugaufprall)
- Materialfestigkeit (Druckfestigkeit)
- Form
- Erosion (Abwitterung)

Aus der jeweiligen Bauweise, der Form und den statischen Berechnungen ergeben sich bestimmte Wandstärken und geeignete Fundamentierungsvarianten. Diese sind im Abschnitt 5 auf Seite 25 ff. ausführlich behandelt.

2.5. Ökologische und geographische Aspekte

Die Grundidee für eine Lärmschutzwand aus Lehm ist die gegenüber herkömmlichen Lärmschutzwänden bessere Naturverträglichkeit, Nachhaltigkeit, die naturnahe Ästhetik, und sogar eine zumindest teilweise Eignung als ökologische Ausgleichsmaßnahme für den Bau der Autobahn und den entsprechenden Flächenverlust.

Die ökologischen Untersuchungen und die Planung für die Integration von Elementen als Siedlungsraum für viele Wildbienenarten und für mehrere Fledermausarten, unter Umständen sogar für manche Vogelarten stellen einen wesentlichen Teil der Studie dar. Unter anderem die oben aufgeführten Aspekte sind es schließlich, die den erheblichen Mehrwert einer Lärmschutzwand aus Lehm gegenüber einer herkömmlichen Lärmschutzwand darstellen und die höheren Kosten rechtfertigen.



Abb. 2 Wildbiene in Wellerlehmwand; Foto Christian Hansel

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass eine Lehm-Lärmschutzwand bei Nebelin nicht nur als isolierte ökologisch wirksame Maßnahme zu verstehen ist, sondern auch als möglicher Trittsteinbiotop für verschiedene Arten, und dass sie im Verbund mit Gehölz- und Buschwerkinseln, Tümpeln, Flüsschen und Kanälen in der Umgebung einen Beitrag zur Vernetzung von Habitaten leisten kann, wobei die unmittelbare Nähe des Biosphärenreservats Elbe-Brandenburg eine Rolle spielt.

2.6. Kosten, Dauerhaftigkeit und andere ökonomische Aspekte

Für die drei verschiedenen von uns projektierten Bauvarianten haben wir Bau- und Lebenszykluskosten sowie Kosten für die Wartung berechnet, bzw. geschätzt. Aspekte wie Auswirkungen auf die regionale Wirtschaft sind in der TH Lübeck in Arbeit.

Aufgrund empirischer Erfahrungswerte mit Lehmbau (Stampf- und Wellerlehm) und historischen Beispielen ist von sehr hoher Dauerhaftigkeit bei geringem Wartungsaufwand auszugehen. Es kann von einem Lebenszyklus von mindestens 100 Jahren (typischerweise deutlich mehr) ausgegangen werden. Der irgendwann möglicherweise erforderliche Abbau und die Entsorgung des Wandmaterials – sei es Stampf- oder Wellerlehm – ist mechanisch mit geringem Aufwand und mit sehr wenig Energieverbrauch durchführbar; wegen seiner Natürlichkeit, keinen synthetischen Zusätzen und wegen der lokalen oder regionalen Materialherkunft kann der Lehm vor Ort einfach eingeebnet werden.

3. Konzeption als Pilotvorhaben und Forschungsprojekt

Die aktuelle Planung sieht für den Bauabschnitt Bau-Km 15+220 und Bau-Km 15+789 eine Lärmschutzwand von 568 m Länge vor (Schutzabschnitt 11 im Erläuterungsbericht, S. 143). In unserem Konzept ist diese verpflichtend zu errichtende Lärmschutzwand als Stampflehm-Trägerwand (Stampflehm-Fertigbauteile zwischen Stahlträgern mit Bohrpfahlgründung) geplant, sowie zusätzliche Lärmschutzabschnitte im Bereich der Raststätte Nebelin als Schwerlastwände, die als prototypische Forschungsobjekte für ökologisch verträglichen Lärmschutz in den Bautechniken Stampflehm und Wellerlehm einem längerfristigen Monitoringprozess unterliegen.

Teil I: Projektierung und Bau

Konzeption – Statik – Bauverfahren – Vorfertigung – Feldfabrik – Wandernde Verschalung – Stampflehm – Wellerlehm – Wellerlehmpresse – Trägerwand – Schwerlastwand – Formgebung – Erosion – Lebensraum

Die vorliegende Studie schlägt Lehlärmschutzbauten mit einer Länge von ca. 4,2 km und einer Höhe von vier bis sieben Metern vor. Sie bezieht einen Tank und Rastplatz und dessen Bauten mit ein. Sie untersucht als Bauvarianten die Trägerwand und die Schwerlastwand und die beiden Lehmbautechniken Stampflehm und Wellerlehm. Alle Varianten wurden auf ihre statischen Eigenschaften und auf ihre Druckfestigkeit untersucht und für den vorgeschlagenen Bau als geeignet eingestuft.

Die Variante Trägerwand schlagen wir für den gesetzlich vorgeschriebenen Bauabschnitt von 570 m Länge vor. Diese Ausführung kombiniert eine konventionelle Gründung mit einer erprobten Stampflehmtechnologie (Abschnitte 6.1; 6.2). Für die anderen Bauabschnitte schlagen wir Schwerlastwände vor. Alle genannten Varianten nutzen für die Lehmbauteile ausschließlich lokale Ressourcen. Sowohl für die Trägerwand, als auch für die Schwerlastwand gilt: Durch innovative Technologie kann sowohl terminlich genau kalkuliert, als auch die Arbeitszeit verkürzt und somit die Einfügung in großtechnische Bauprozesse gewährleistet werden. Beim Wellerlehm betreten wir dabei Neuland. Die Formgebung der Lehlärmschutzwände folgt zum einen den statischen Berechnungen und zum anderen einer materialgerechten, zeitgenössischen Architektursprache.

In allen Verfahren ist kontrollierte Erosion eingeplant. „Erosionsbremsen“ werden mit ökologischer Doppelfunktion ergänzt; Auswaschungen durch Spritzwasser werden durch Betonsockel und Betonschutzwand verhindert. Abwitterungsschichten steigern die akustische Wirksamkeit. (Abschnitt 10 auf Seite 62)

Der ökologische Mehrwert der Lehlärmschutzwand wird durch die Ausgestaltung als Lebensraum gesteigert: durch eigens entwickelte Bienensteine, Bienen-, und Vogellehm für gefährdete Arten, dem Einfügen von Schilfrohr oder Fledermausnischen (Abschnitt 12 auf Seite 89).

Anhand einer Probewand in Nebelin wurden alle oben genannten Technologien und Bau-Elemente erfolgreich modellhaft erprobt (Abschnitt 8 auf Seite 51).

4. Konzeptvorschlag: Lehmwandschutzwand bei der geplanten Rastanlage Nebelin

Das Ideenkonzept der Machbarkeitsstudie für die Lehmbauwände an der A14 geht über den in den Planunterlagen vorgesehenen Lärmschutz für die Bahnsiedlung erheblich hinaus und schließt den sich nördlich anschließenden Tank- und Rastplatz mit seinen Aus- und Einfädeleisenbahnen komplett, einschließlich einer Abtrennung des Rastplatzes von den Fahrbahnen, mit ein.

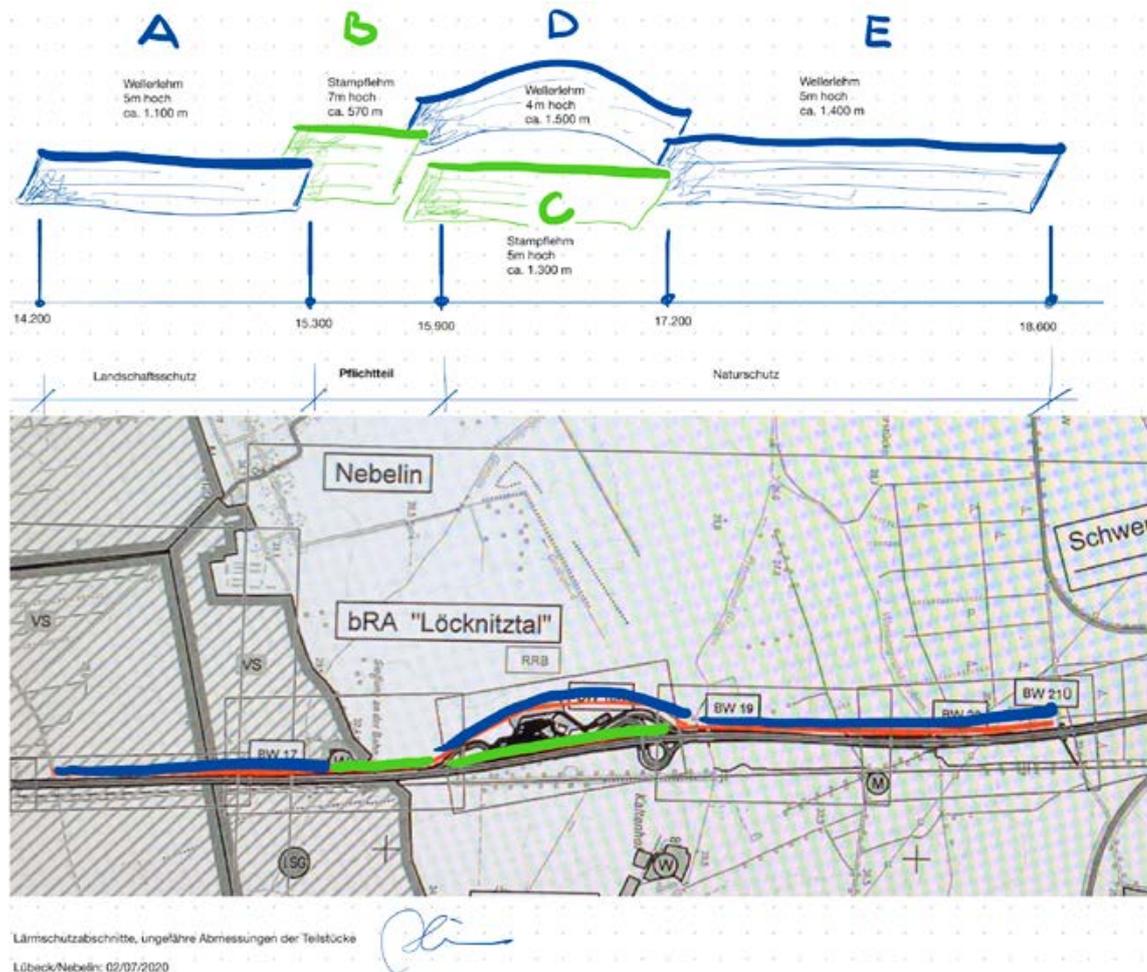


Abb. 3 Skizze des Ideenkonzepts der Gesamtanlage Lehmwandschutzwand. Grafik Heiner Lippe
 A, E Schwerlastwände Wellerlehm, H. 5 m, mittlere Wandstärke: 120 cm, L. A ca. 1100, E ca. 1400 Meter
 B Stampflehmwand mit Stahlrammgründung, 7 m Höhe, Wandstärke: 45 cm, Länge 570 Meter
 C Schwerlastwand Stampflehm, 5 m Höhe, mittlere Wandstärke: 100 cm, Länge ca. 1300 Meter
 D Schwerlastwand Wellerlehm, 4 m Höhe, mittlere Wandstärke: 100 cm, Länge ca. 1500 Meter

4.1. Ausgangssituation und Verhältnis zur Genehmigung der A14

Ansatzpunkt für die Initiative zu Planung und Bau einer Lärmschutzwand in Lehmbauweise bei Nebelin sind die Planungen für die A14 Magdeburg–Schwerin mit Verlauf nördlich der Elbquerung im Land Brandenburg im Abschnitt zwischen den Anschlussstellen Wittenberge und Karstädt. Der Abschnitt ist insgesamt 17,8 km lang.

Im Rahmen des derzeit laufenden Planfeststellungsverfahrens wurden die Planungsunterlagen im März / April 2019 in den betroffenen Kommunen öffentlich ausgelegt bzw. im Internet veröffentlicht. Einwendungen gegen den Plan waren bis zum 15. Mai 2019 möglich. In diesem Zeitraum ist seitens der Nebeliner Bürger*innen vorgetragen worden, dass der planerisch vorgesehene Lärmschutz nicht ausreiche, in den Bereich der Tank- und Rastanlage nach Norden hin ausgedehnt werden müsse, um die Wohnsiedlung effizient zu schützen. Darüber hinaus sind dann Überlegungen entstanden, als Teil eines Gesamtprojekts die gesamte Tank- und Rastanlage einzubinden.

4.1.1. Auswertung der Planfeststellungsunterlage

Zwischen Bau-Km 15+220 und Bau-Km 15+789, auch als Schutzabschnitt 11 im Erläuterungsbericht bezeichnet (S. 143, s. nachfolgende Tabelle), ist unmittelbar westlich der Autobahn ein Lärmschutzbauwerk (LA 11) zum Schutz der außerhalb des Ortszusammenhangs gelegenen Wohngebäude der Nebeliner Bahnsiedlung als Vorzugsvariante beschrieben und vorgesehen (s. Lageplan Blatt 14).

| LSW Bezeichnung | von Bau-km | bis Bau-km | Länge | max. Höhe | Fläche | Kosten |
|------------------------|------------|------------|-------|-----------|----------------|--------------|
| Nebelin - Bahnsiedlung | | | m | m | m ² | € |
| LSW Schutzabschnitt | 15+220 | 15+789 | 568 | 7,0 | 3680 | 1.417.640,00 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| LSW beidseitig hochabsorbierend | A3 |
| mögliche Lärmquelle auf der Rückseite | bRA |

| | |
|-------|--------------|
| Summe | 1.417.640,00 |
|-------|--------------|

Tabelle 1 Auszug Lärmschutzwand 11, technische Angaben (Unterlage 1 Erläuterungsbericht, S. 143)

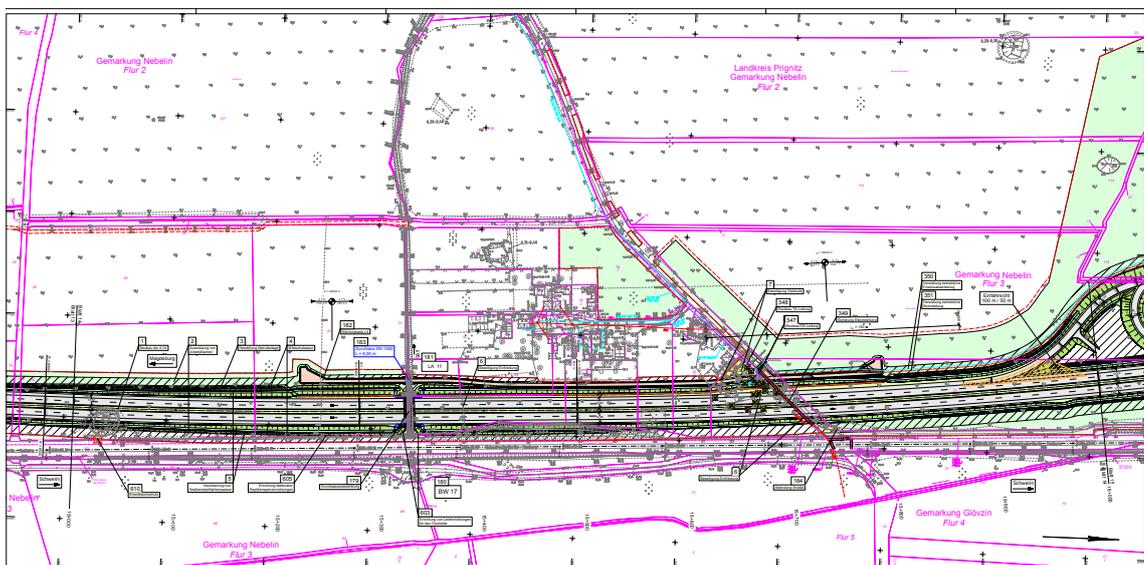


Abb. 4 Auszug aus Lageplan Blatt 14

Die Lärmschutzwand hat eine Höhe von sieben Metern über der Straßenoberfläche, verhindert jedoch nicht, dass auch passiver Schallschutz an den Häusern erforderlich wird. Sie wird durch einen außerhalb gelegenen Wartungsweg mit Wendepplatz von der Premsliner Straße aus erschlossen (s. Unterlage 10 Regelungsverzeichnis Nr. 181f). Parallel zur Lärmschutzwand bei Km 15+600 endet die Einfädelspur der sich nördlich anschließenden, ebenfalls westlich der A14 gelegenen Tank- und Rastanlage, deren bauliche Maßnahmen inkl. Ausfädelspur sich bis etwa in den Bereich Km 17+350 erstrecken. Die Tank- und Rastanlage wird mit 90 Pkw- und 60 Lkw-Stellplätzen ausgestattet.

Details zu LA 11 sind dem Lageplan der Immissionsorte zu entnehmen (Unterlage 11.3.2 Blatt 6). Demnach wird die maximale Höhe der Lärmschutzwand in Meter-Stufen nach ca. 50 m vom jeweiligen Beginn des Bauwerks erreicht. Die Lärmschutzwand wird oberhalb der Dammböschung errichtet. Die Gebäude bzw. Fassadenpunkte mit Grenzwertüberschreitungen sind markiert und ausgewiesen.

4.1.2. Umsetzung einer Lehmlärmschutzwand nach Planfeststellung

Die Antragstellerin für die geplante A14, die DEGES, geht davon aus, dass im Jahr 2021 der Planfeststellungsbeschluss gefasst werden wird, d.h. für Umsetzungsüberlegungen dieses ambitionierten Vorhabens ist die verbleibende Zeit zur Vorbereitung aller bis zur Ausführung erforderlichen Schritte möglich. Üblicherweise erfolgen aufgrund von Einwendungen der Betroffenen noch

Korrekturen der Planung, so dass auch das Anliegen einer in Lehmbauweise errichteten Lärmschutzwand berücksichtigt werden kann.

Der Entwurf aus dem Workshop bezieht sich auf den Stand der technischen Planung 3/2018, wie sie derzeit aufgrund der Offenlegung bekannt ist. Die für das Bauwerk zur Verfügung stehenden Flächen werden größenordnungsmäßig genutzt.

5. Konstruktion

5.1. Allgemeines

Als Grundlage der Wandkonzeption dienen die allgemeinen Anforderungen der ZTV-Lsw 06 und die damit verbundenen allgemeinen Bemessungsregeln der Tragwerksplanung (Eurocode). Der Fokus der statischen Konzeption richtet sich für alle untersuchten Konstruktionslösungen auf den Nachweis der Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

Im Folgenden wird die Entwicklung von alternativen Konstruktionslösungen für die Umsetzung einer Lehm-lärmschutzwand zusammengefasst. Die Ergebnisse der statischen Vorbemessung sind im Anhang 16.5 zusammengefasst.

5.2. Statisches System

Das statische System der Lehm-lärmschutzwand wird analog zu konventionellen Tragwerken von Lärmschutzwänden vorgesehen. Die Konstruktion wird als Kragträger betrachtet. Über eine Einspannung am Fußpunkt der Konstruktion erfolgt die Weiterleitung der Lasten (vertikal und horizontal) in die Gründung.

5.3. Lasten

Die vertikalen Lasten resultieren aus dem Eigengewicht der Konstruktion. Die Rohdichte von Stampflehm wird zu 2100kg/m^3 , von Wellerlehm zu 1800kg/m^3 angenommen.

Die maßgebenden horizontalen Lasten ergeben sich aus dem Windlastfall. Ein Seitenstoß aus Fahrzeuganprall (gem. DIN Fachbericht 101) wird für die Wandbemessung zunächst vernachlässigt. Eine sekundäre Leitkonstruktion ist vorgesehen.

Die Windlasten werden gemäß DIN EN 1991-1-4/NA ermittelt. Die Last wirkt normal zur betrachteten Wandfläche.

Windlast $W_k = c_{p,net} \times q_k$

Gebäude-/Standortparameter

| | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Gebäudestandort: | Brandenburg |
| Windzone, Geländekategorie: | 2, Binnenland |
| Wandhöhe | $h = 4 \text{ m} / 7 \text{ m}$ |

Geschwindigkeitsdruck q_k

Die vereinfachte Annahme für die Ermittlung des Böengeschwindigkeitsdrucks bei Bauwerken bis zu einer Höhe von 25 m über Grund für nicht schwingungsanfällige Bauwerke und Bauteile (DIN EN 1991-1-4) ist zulässig.

Geschwindigkeitsdruck: $q_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$ (für $h < 10 \text{ m}$)

Druckbeiwerte $c_{p,net}$

Die Druckbeiwerte sind abhängig von dem betrachteten Bereich der Wand (Abstand vom Rand). Folgende Werte ergeben sich für die vorliegenden Randbedingungen:

| |
|-----------------------|
| $c_{p,net, A} = 3,40$ |
| $c_{p,net, B} = 2,10$ |
| $c_{p,net, C} = 1,70$ |
| $c_{p,net, D} = 1,20$ |

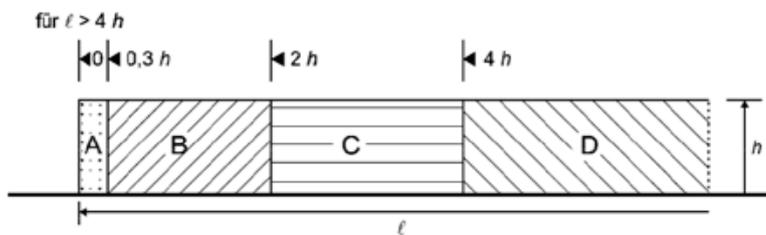


Abb. 5 Flächeneinteilung freistehender Wände gem. DIN EN 1991-1-4, 7.4.1 Bild 7.19

5.4. Geometrieentwicklung

5.4.1. Schwerlastwand

Die Grundlegende Idee für eine Lehmlärmschutzwand folgt zunächst der Annahme, dass die Wandkonstruktion rein aus Lehmmaterial erstellt werden kann. Die Gründung ist hiervon ausgenommen. Um dies realisieren zu können, muss die Konstruktion sich ‚selber‘ tragen.

Als Konstruktionsprinzip wird hierzu eine Schwerlastwand angenommen. Die Konstruktion der Schwerlastwand besteht aus massiven Lehmelementen. Die vertikale Last aus dem Eigengewicht wird über Kontaktpressung in die Gründung eingeleitet. Die horizontalen Lasten werden über Biegung der Wand an die Gründung weitergeleitet. Hierbei dient das Eigengewicht der Konstruktion dazu, abhebende Kräfte aus der Biegebeanspruchung am Fußpunkt im Gleichgewicht zu halten.

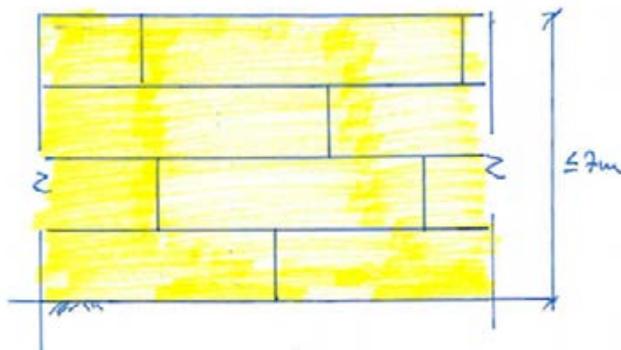


Abb. 6 Ansicht der Schwerlastwand / überlappende Anordnung der Lehmelemente, Zeichnung Jan Mittelstädt

Für die Ermittlung der erforderlichen Wandquerschnittsfläche erfolgt der statische Nachweis im Rahmen einer Vordimensionierung. Es erfolgt der Nachweis der klaffenden Fuge zwischen der Gründung (Flachgründung) und den Lehmteilen bzw. der Nachweis zum Kippen gem. DIN EN 1054:2010.

Es zeigt sich, dass der Nachweis der klaffenden Fuge für die Ermittlung der erforderlichen Wandquerschnittsfläche für unterschiedliche Wandhöhen maßgebend wird.

Nachweisführung

Nachweis Kippen

Einwirkendes Moment

Widerstehendes Moment

$$M_{dest} \leq M_{st}$$

$$M_{dest, Ed} = M_{Wind, Ed} = w_k \times h_{Wand}^2 / 2$$

$$M_{st} = N \times b_{Wand} / 2 = h_{Wand} \times b_{Wand}^2 \times \gamma_{Lehm} / 2$$

$$M_{Wind, Ed} = h_{Wand} \times b_{Wand}^2 \times \gamma_{Lehm} / 2$$

$$b_{Wand}^2 = M_{Wind, Ed} \times 2 / (h_{Wand} \times \gamma_{Lehm})$$

Nachweis klaffende Fuge

$$e \leq b_{\text{Wand}}/6$$

$$M_{\text{Wind, Ed}} / N \leq b_{\text{Wand}}/6$$

$$M_{\text{Wind, Ed}} / h_{\text{Wand}} \times b_{\text{Wand}} \times b_{\text{Wand}}/6$$

$$b_{\text{Wand}}^2 \geq M_{\text{Wind, Ed}} \times 6 / (h^* \gamma_{\text{Lehm}})$$

Die horizontale Beanspruchung der Wand variiert entlang der Längsachse. In den Rand- bzw. Eckenbereichen (vgl. 5.4) ergeben sich höhere Windlastbeanspruchungen durch ablösende Wirbelscheinungen. Es wurden verschiedene geometrische Untersuchungen zur Ausbildung einer effizienten Wandgeometrie im Rand – bzw. Eckbereich vorgenommen. Neben einer Abstufung der Höhe, wie bei konventionellen Lärmschutzwänden oftmals der Fall, wird eine Faltung der Grundrissgeometrie vorgesehen. Hierdurch kommt es zu einer Erhöhung der ‚statischen Hebelarmes‘ um die Schwerachse der Wand. Die bemessungsrelevante Randspannung aus dem Kippmoment am Fußpunkt der Konstruktion reduziert sich. Neben der reinen Normalspannung über die Querschnittshöhe wird zudem die Schubwirkung der Lehmelemente in Scheibenachse beansprucht. Die erforderliche Querschnittsabmessung der Wandquerschnitte lässt sich bei gleicher Wandhöhe reduzieren. Neben den statischen Vorteilen ergeben sich hieraus weitere funktionale und ästhetische Aspekte (vgl. Kapitel 9).

Exemplarisch ist in den folgenden Abb. 8 und Abb. 9 die erforderliche Querschnittsbreite für die Variante 1 (lineare Wandanordnung im Grundriss) und Variante 2 (gefaltete Wandanordnung im Grundriss) für unterschiedliche Wandhöhen dargestellt. Im Falle der Schwerlastwand aus Stampflehm, für eine Höhe von 7m, ergibt sich damit eine Querschnittsbreite von ca. 1,2 m. Um eine einheitliche Wandhöhe, auch im Rand- bzw. Eckenbereich zu erreichen, ist im Bereich A-B (vgl. Abb. 9) eine Faltung mit $\alpha=60^\circ$ vorzusehen.

Für die Ausführung der Schwerlastwand in Wellerlehmbauweise wird ein ca. 20% größerer Querschnitt erforderlich.

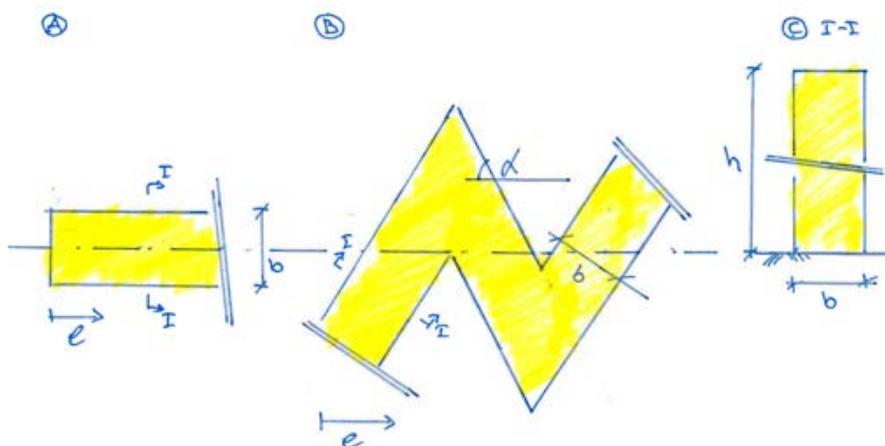


Abb. 7 Konstruktionsprinzipien für Schwerlastwände aus Stampflehm – Aufsicht Variante 1 (A) und Variante 2 (B), Schnitt I-I (C). Zeichnung Jan Mittelstädt

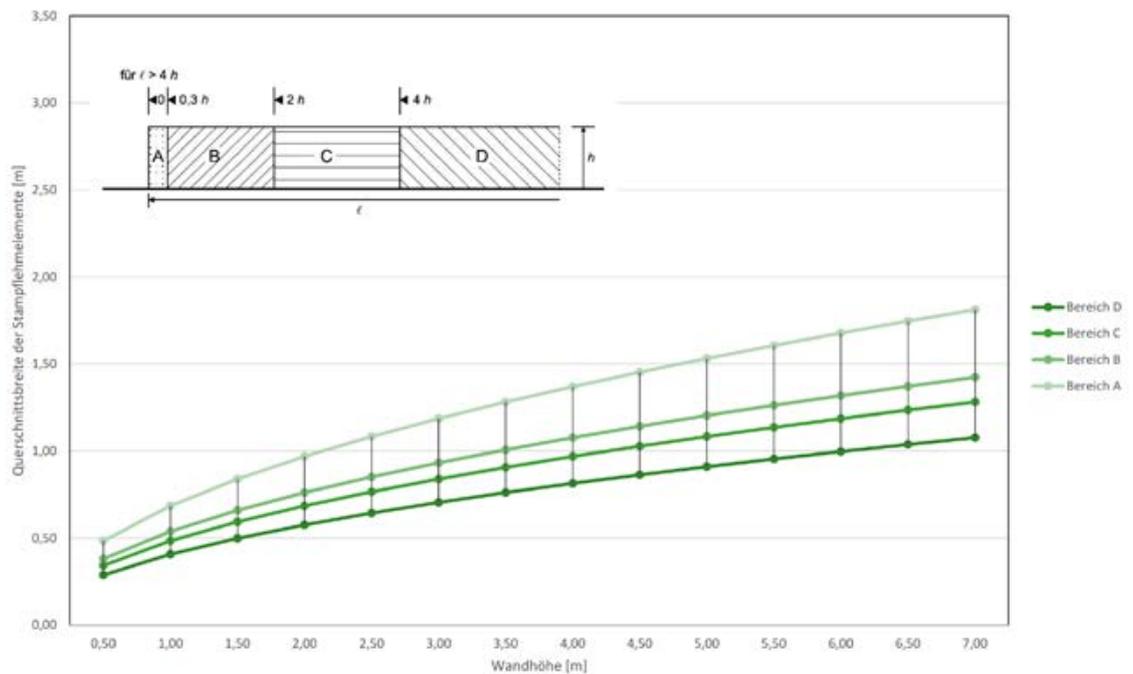


Abb. 8 Bereichsweise Angabe der Querschnittsabmessung der Stampflehmelemente / Wandhöhe – Variante 1. Grafik Jan Mittelstädt

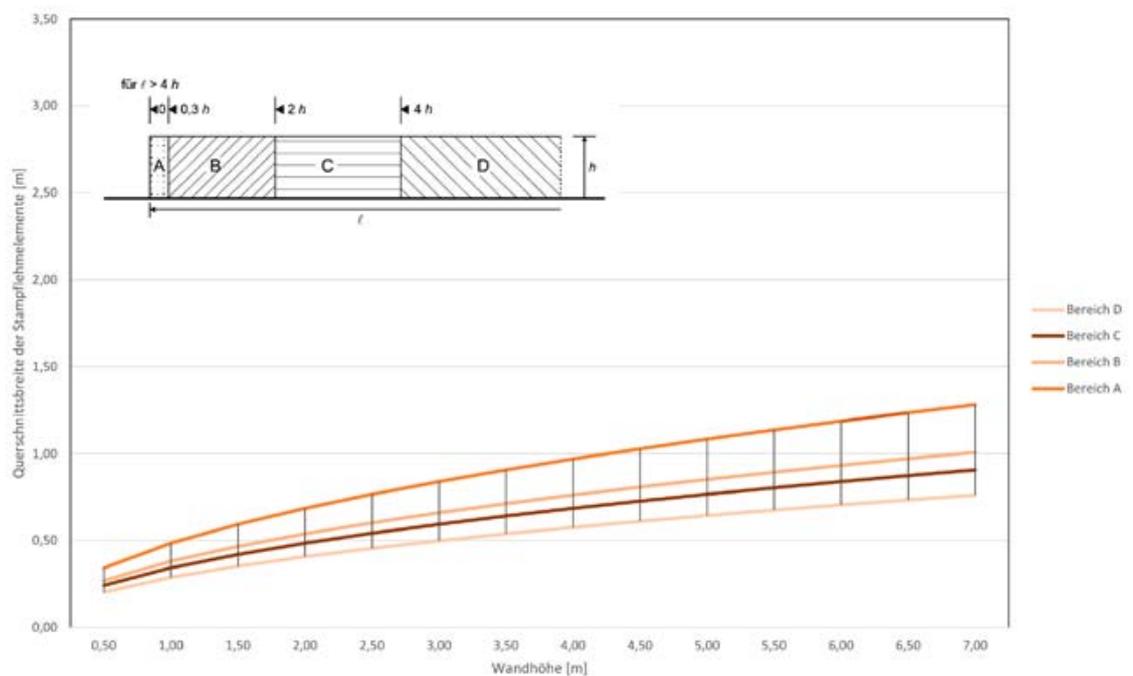


Abb. 9 Bereichsweise Angabe der Querschnittsabmessung der Stampflehmelemente / Wandhöhe - Variante 2 ($\alpha=60^\circ$). Grafik Jan Mittelstädt

5.4.2. Trägerwand

Als Alternativlösung zur Variante der Schwerlastwände (5.4.1) wurde eine Trägerwand mit ‚Lehmkassetten‘ entwickelt. Die Konstruktion der Trägerwand erfolgt in Analogie zu konventionellen Lärmschutzwänden, bestehend aus einer Tiefgründung mit Stützen aus Stahl, einem Sockel aus Beton und Lärmschutzkassetten. Die Lärmschutzkassetten normalerweise hergestellt aus Beton, Holz- oder Aluminiumpaneelen werden hierbei mit Lehmelementen ersetzt.

Die vertikalen Beanspruchungen aus dem Eigengewicht der Lehmelemente werden über den Sockel aus Stahlbeton aufgenommen und an die Tiefgründung weitergeleitet. Die Höhe des Sockels ergibt sich aus den funktionalen Randbedingungen, dem Spritzschutz sowie dem Geländesprung

(vgl. Regelquerschnitt 5.7.1). Die statische Höhe zur Aufnahme der vertikalen Eigenlast aus den Lehmelementen ist hinreichend groß. Die Tiefgründung wird aus Bohrpfählen ($d=60\text{ cm}$) geplant.

Die horizontalen Beanspruchungen werden über die Lehmelemente aufgenommen und von diesen über Biegung an die Stützen aus Stahl weitergeleitet. Die Stützen aus Stahl sind in die Tiefgründung biegesteif eingespannt und wirken statisch als Kragträger. Konstruktiv erfolgt die Anbindung der Stützen aus Stahl an die Tiefgründung über einen Köcher mit nachträglichem Betonverguß.

Ergebnisse der Vorbemessung (vgl.) ergeben einen Abstand der Stahlstützen zwischen 4-6m, HEB300 (S235) Stützenprofile, Bohrpfahllängen zwischen 6-8m mit einem Durchmesser von 60cm und einen Lehmwandquerschnitt (Stampflehm) von ca. 40cm.

Die Elementlängen der Lehmelemente liegen aus baupraktischen Gründen bei ca. $<4,5\text{ m}$. Für den Stützenabstand von $a=4\text{ m}$ spannt ein Lehmelement zwischen den Stahlstützen. Die horizontale Beanspruchung der Wand wird über horizontale Biegung der Lehmelemente an die Stahlstützen weitergeleitet. Für einen Stützenabstand von $a=6\text{ m}$ sind die Lehmelemente horizontal zu stoßen. Der horizontale Lastabtrag muss nun vertikal erfolgen. Hierzu wird ein Flachprofil FL200x20, S235 mit aufgeschweißter Schubleiste 100x10, S235 in der horizontalen Elementfuge angeordnet (ca. alle 3,5m in der Höhe). Das Flachprofil leitet die horizontalen Beanspruchungen an die Stahlstützen weiter.

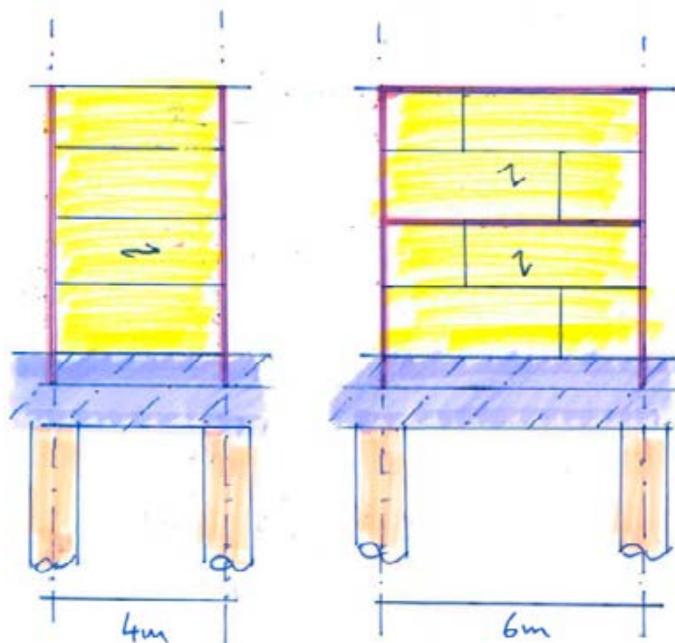


Abb. 10 Ansicht der Varianten zur Trägerwand. Zeichnung Jan Mittelstädt

5.5. Gründung

Die Gründung für die Variante der Schwerlastwand (5.4.1) erfolgt auf einem massiven Streifenfundament in Stahlbetonbauweise. Die Bauweise ist in Ortbeton oder als Fertigbauteil ausführbar. Die Vorbemessung, auf Grundlage von Annahmen eines Einheitsbodens, ergibt die Abmessungen von $b \times h = 200 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ (vgl. 5.7).

Die Gründung für die Variante der Trägerwand (5.4.2) erfolgt in Anlehnung an konventionelle Konstruktion von Lärmschutzwänden. Die Stützpfeiler werden über i) eine Tiefgründung (Stahlrammrohr, Bohrpfehl) punktuell in einem Abstand zwischen 4 m - 6 m gegründet, bzw. ii) alternativ über eine punktuelle Flachgründung. Die Art der Gründung ist abhängig von den örtlichen Gegebenheiten (Hanglage, Bodenverhältnisse). Die Stützpfeiler bestehen aus standardisierten Stahlprofilen und werden über z.B. ein Köcherfundament an die Gründung angebunden. Empfehlung der ZTV-Lsw sind zu beachten.

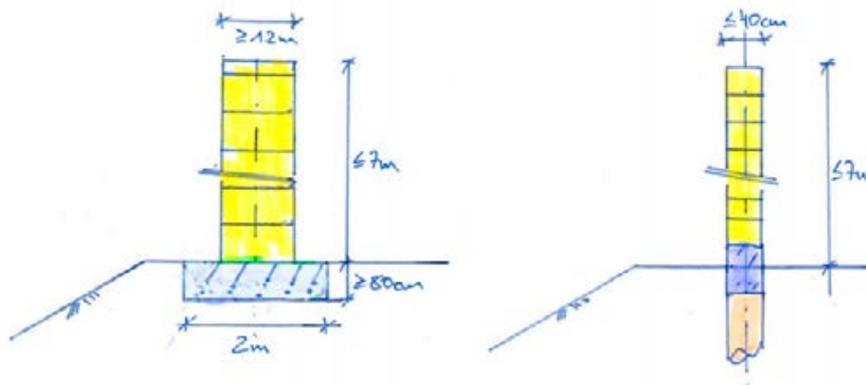


Abb. 11 Schwerlastwand (links), Trägerwand (rechts). Zeichnung Jan Mittelstädt

5.6. Lehmbaustatik

Die Bemessung der Lehmelemente erfolgt in Anlehnung an die bauaufsichtlich eingeführten Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e.V. Die Lehmbau-Regeln sehen noch eine Bemessung nach dem Konzept des globalen Sicherheitsbeiwertes vor, dass auf der Abminderung der Druckfestigkeit auf zulässige Spannungen beruht. Zur Bemessung wird daher die DIN 1053-1:1996 herangezogen. Die Nachweise werden nicht nach dem „Vereinfachten Verfahren“, sondern nach dem „Genaueren Verfahren“ geführt.

Eine versuchstechnische Ermittlung der Materialeigenschaften ist im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für die Lehmkonstruktion vorzusehen. Hierzu gehören neben den entsprechenden Begleitprüfungen der örtlich vorgesehenen Materialien, Abstimmungen zu dem Sicherheitsniveau und dem Vorgehen in der Bemessung. Der Umfang des für die ZiE vorzusehenden Versuchsprogrammes erfolgt in Abstimmung mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde. Die Konzeption der Wandtypen sieht hierbei zunächst die Ermittlung von Druckfestigkeiten und Rohdichten vor. Für die statischen Vorbemessungen werden die Druckfestigkeiten gem. Kapitel 5.8 angenommen, sowie Erfahrungswerte für vergleichbare Mischungen eines Stampflehms (vgl. nachfolgende Zusammenstellung).

Materialparameter Stampflehm nach Angaben der Firma Lehm Ton Erde

| | | |
|---|------------------|--------------------------|
| Rohdichte | ρ | = 2100kg/m ³ |
| Druckfestigkeit | β_0 | = 2,4 N/mm ² |
| Zulässige Druckspannung | σ_0 | = 0,34 N/mm ² |
| Abminderungsfaktor f_a aufgrund der Bewitterung | f_a | = 0,8 |
| Zulässige abgeminderte Druckspannung | $\Delta\sigma_0$ | = 0,27 N/mm ² |

Da die Stampflehmelemente der Witterung ausgesetzt sind, kann der Feuchtegehalt ansteigen, wodurch die Druckfestigkeit des Stampflehms abnimmt. Die Druckfestigkeit wird aufgrund von Erfahrungswerten vergangener ZiE mit dem Faktor 0,8 abgemindert.

E-Modul $E = 4100\text{N/m}^2$
E-Modul nach Forschungsbericht von Miccoli, Müller, Perrone, Ziegert.

Kriechen $0,2\%$
 Lehmörtel $f_{yk,0} = 0,02\text{N/m}^2$

Die Biegetragfähigkeit der Lehmelemente ist gering. Im Falle horizontaler Riegel zwischen den Stützpfählern, in der Art eines Ringbalkens, wirkt das Eigengewicht der Konstruktion günstig auf das Tragverhalten und ermöglicht den Spannungsnachweis über den Querschnitt. Für den Fall einer Biegebeanspruchung um die vertikalen Achse sind ergänzende Verstärkungen in Form von z.B. Geogittern in jeder 2. - 3. Schicht vorzusehen.

Standsicherheitsnachweis einer Stampflehmwand – Theoretische Grundlagen

Genaueres Verfahren nach DIN 1053-1:1996

Nachweis nach der ‚Methode der zulässigen Spannungen‘ mit einem globalen Sicherheitsfaktor, wie in den Lehmbau-Regeln vorgegeben.

Nachweis: $\gamma_w \times \sigma_R < \beta_R$

Tragfähigkeit bei zentrischer und exzentrischer Beanspruchung

Bruchzustand

Rechenwert der Druckfestigkeit

bei zentrischer Beanspruchung $\beta_R = 2,67 \times \sigma_0 = 0,72 \text{ N/mm}^2$
 bei exzentrischer Beanspruchung $\beta_R = 1,33 \times \sigma_0 = 0,96 \text{ N/mm}^2$

Sicherheitsbeiwert allgemein $\gamma_w = 2,0$

Ermittlung der Spannungen

bei zentrischer Beanspruchung $\sigma_R = N/(bxd)$
 bei exzentrischer Beanspruchung
 für $0 < e_{ges} < d/6$ $\sigma_R = N/(bxd) \times (1 + (6e_m/d))$
 für $d/6 < e_{ges} < d/2$ $\sigma_R = 2N/(3x(d/2 - e_m)xb)$
 Plattenschub/Scheibenschub $\tau = 1,5V/(bxd)$

Gebrauchslast

Planmäßige Exzentrizität $e = M/N < d_1/3$

Auszug aus DIN 4149:2005-05, Kapitel 11.7.3 (6)

(6) Die Beschränkung des Klaffens der Querschnitte nach DIN 1053-1:1996-11, 6.9.1 bzw. 7.9.1 und die Anforderungen an die zulässige Randdehnung sind nicht zu berücksichtigen.

Zusatznachweis bei Scheibenwirkung, falls klaffende Fuge rechnerisch vorhanden ($e > d/6$).

Auszug aus DIN 1053-1:1996, Kapitel 7.9.1

Bei Querschnitten mit Scheibenbeanspruchung und klaffender Fuge ist zusätzlich nachzuweisen, daß die rechnerische Randdehnung aus der Scheibenbeanspruchung auf der Seite der Klaffung unter Gebrauchslast den Wert $\epsilon = 10^{-4}$ nicht überschreitet.

Plattenschub

Nachweis: $\gamma \times \tau < \beta_{RHS} + \mu \times \sigma$

Scheibenschub

Nachweis: $\gamma \times \tau < \beta_{RHS} + \Delta\mu \times \sigma$
 $< 0,45 \times \beta_{RHS} \times \sqrt{(1 + \sigma/\beta_{RZ})}$

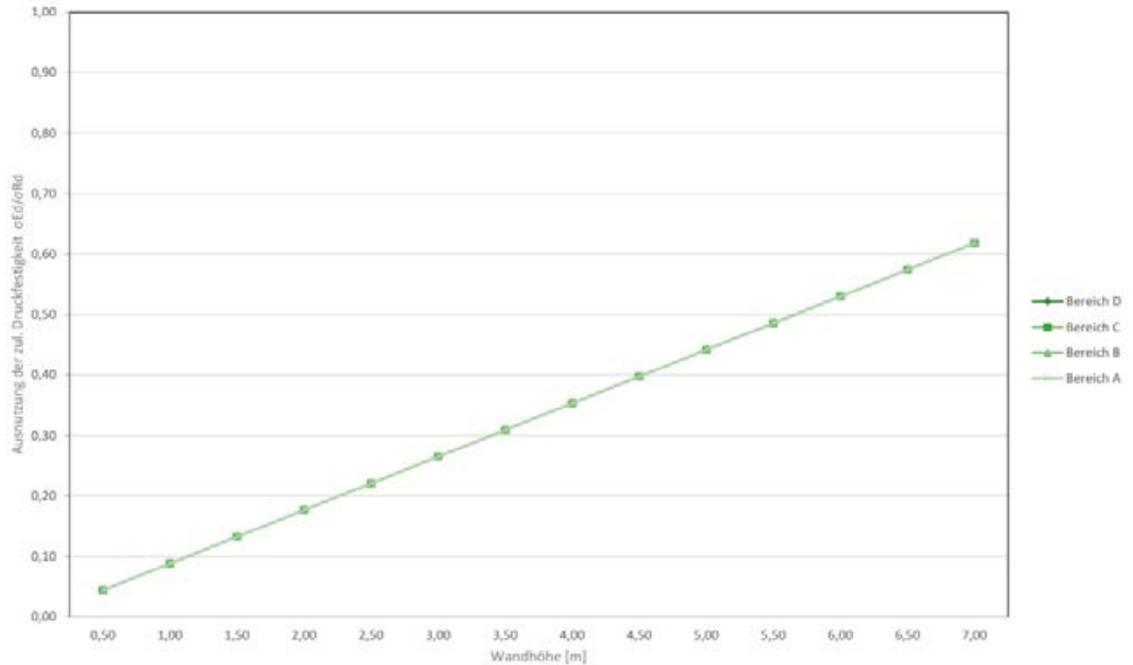


Abb. 12 Ausnutzung der Druckfestigkeit – Schwerlastwand Variante 1 (4.3.1), h=7m, d=1,2m. Grafik Jan Mittelstädt

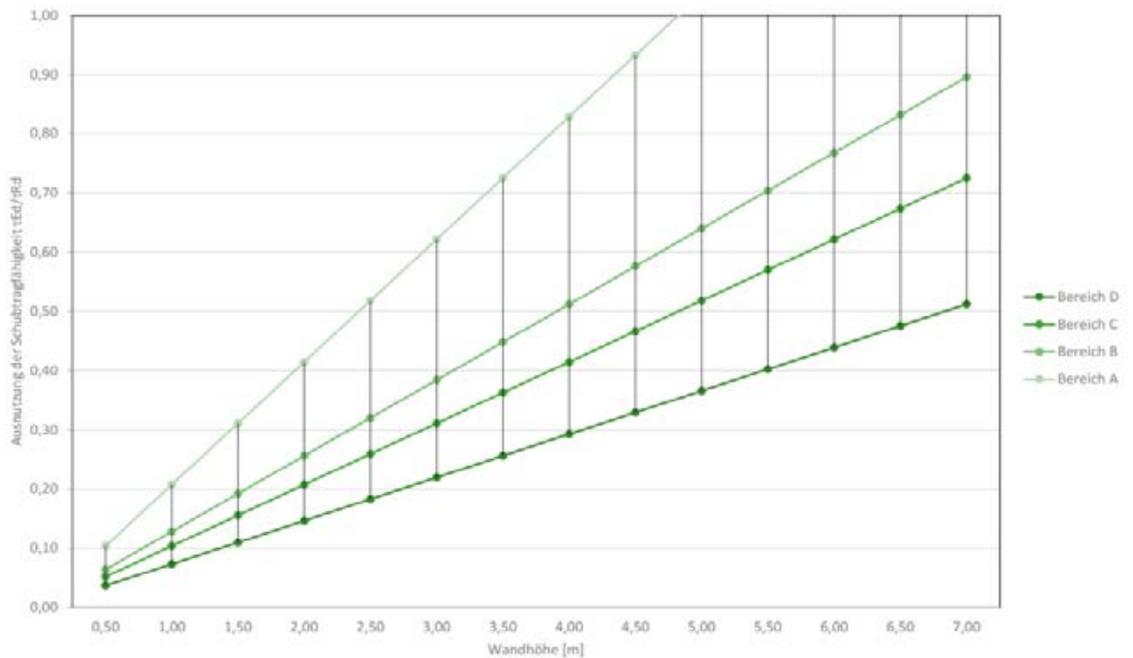


Abb. 13 Ausnutzung der Schubtragfähigkeit – Schwerlastwand Variante 1 (4.3.1), h=7m, d=1,2m. Grafik Jan Mittelstädt

Würfel werden anschließend in einer hydraulischen Presse bis zum Versagen abgedrückt. Die maximal aufzubringende Spannung wird gemessen.

Diese Werte lassen sich mit anderen Testreihen der gleichen Art vergleichen. So kann der vorhandene Lehm mit anderen Lehmvorkommen verglichen werden, um die Tragfähigkeit einordnen zu können. Zudem kann eine Tendenz für die zu erwartende Lastaufnahme ermittelt werden.

Bei den Versuchsreihen ist zu bedenken, dass die Herstellung der Würfel einen wesentlichen Einfluss auf die Druckfestigkeit des Würfels hat. Aufgrund der handwerklichen Herstellung der Würfel sind große Streuungen zu erwarten.

Um den Einfluss der Würfelgröße auf die Druckfestigkeit zu untersuchen und bei der Auswertung berücksichtigen zu können, werden zwei Versuchsreihen gefahren: Eine Versuchsreihe besteht aus Würfeln der Größe 15/15/15 cm, die zweite Versuchsreihe aus Würfeln der Größe 20/20/20 cm.

5.8.1. Versuchsergebnisse

Würfel 15/15/15:

| Nummer | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------------------------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Gewicht vor Trocknung [g] | 7075 | 7155 | 6930 | 7085 | 6894 | 7017 | 6801 | 6944 |
| Gewicht nach Trocknung [g] | 6763 | 6848 | 6675 | 6799 | 6603 | 6724,7 | 6503,2 | 6664,5 |
| Prüfkraft [kN] | 30,32 | | 24,366 | 22,068 | 18,344 | 26,596 | 16,221 | 17,465 |
| Bruchlast [N/mm ²] | 1,35 | 1,27 | 1,08 | 0,98 | 0,82 | 1,18 | 0,72 | 0,78 |

Tabelle 2 Druckfestigkeit von Lehm aus dem Kieswerk bei Nebelin; Würfel 15 cm³

Der Würfel Nr. 8 wurde quer zur Stampfrichtung geprüft, um zu sehen, welche Auswirkung die Stampfrichtung auf die Druckfestigkeit hat. Ein großer Unterschied wurde in diesem Fall nicht festgestellt. Dies ließe sich genauer untersuchen, sollte es sich als notwendig erweisen.

Würfel 20/20/20:

| Nummer | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|--------|---------|---------|
| Gewicht vor Trocknung [g] | 16890 | 16530 | 17320 |
| Gewicht nach Trocknung [g] | 16860 | 16490 | 17280 |
| Prüfkraft [kN] | 68,245 | 112,707 | 109,561 |
| Bruchlast [N/mm ²] | 1,71 | 2,82 | 2,74 |

Tabelle 3 Druckfestigkeit von Lehm aus dem Kieswerk bei Nebelin; Würfel 20 cm³

Auswertung:

Für die Auswertung ist vor allem die Bruchlast wichtig. Die Druckfestigkeit des getesteten Lehms liegt ungefähr bei einem Zehntel der üblicherweise verwendeten Betonsorten. Diese Erkenntnis ist jedoch relativ zu betrachten, da wir im vorliegenden Fall solche hohen Festigkeiten nicht benötigen.

Um die Werte gegenüber anderen Baustoffen besser einordnen zu können, wird der Mittelwert gebildet.

- $F_{\text{mean}, 15} = 1,0225 \text{ N/mm}^2$
- $F_{\text{mean}, 20} = 2,423 \text{ N/mm}^2$

Um einen Wert zu ermitteln, der für eine Bemessung angesetzt werden könnte, müssten deutlich mehr Versuche erfolgen. Dann kann auch ein 5%-Quantil ermittelt werden.

Die ermittelten Werte liegen allerdings im Normspektrum (Vergleichwert und Quelle!).

Nach jetzigem Kenntnisstand kann die Lehmprobe für Bauwerke verwendet werden, da die Druckfestigkeiten erfüllt werden.

Die Druckfestigkeiten der 20/20/20-Würfel sind im Schnitt höher als die der 15/15/15-Würfel. Die Größe der Würfel hat also einen Einfluss auf die Druckfestigkeit: Je größer der zu testende Körper ist, desto geringer vermindert die schwache "Kantenpressung" des Lehms die Druckfestigkeit.

Dieser Effekt wird als Maßstabeffekt bezeichnet. Für die Bemessung in Kapitel 5.4.1 wird die mittlere Druckfestigkeit der Probekörper mit einer Kantenlänge von 20 cm angenommen, basierend auf den Empfehlungen der Lehmbau Regeln (Hrsg. Dachverband Lehm e.V.).

Die kleine Testreihe an der TH Lübeck bestätigt bekannte Prüfreiheiten und Untersuchungen an bestehenden Gebäuden, sie unterstreichen damit steigende Druckfestigkeiten bei zunehmendem Querschnitt der Bauteile.

6. Bauverfahren

6.1. Verfahren Vorfertigung Stampflehmelemente

Vorfertigung im Lehmbau hat einige entscheidende Vorteile gegenüber der Fertigung vor Ort: Sie macht eine Produktion unabhängig von Wetter, ist terminlich genau kalkulierbar und sie verkürzt die Arbeitszeit auf der Baustelle. Eine optimale Einfügung in industrialisierte Bauprozesse wird damit ermöglicht. Durch Vorfertigung haben sich die Produktpalette und die Einsatzmöglichkeiten von Lehmbauteilen stark erweitert.

Für eine wirtschaftliche, termingerechte und von Witterungsverhältnissen unabhängige Umsetzung der Lehlärmschutzwand, unabhängig der Verfahrenstechnik Stampflehm-Trägerwand oder Stampflehm-Schwerlastwand (vgl. 6.2 und 6.3) sollte eine maschinelle Vorfertigung von Stampflehmelementen in Betracht gezogen werden. Die entsprechende Verfahrenstechnik einschließlich Produktionseinrichtung wurde bereits im Jahre 2010 von der Firma Lehm Ton Erde Baukunst GmbH entwickelt und bei zwei Großprojekten (Ricola Kräuterzentrum in Basel 2010 - 2012 und Alnatura Campus in Darmstadt 2016 - 2017) angewendet und wird zudem am neuen Unternehmensstandort des Unternehmens installiert. Entsprechende Erfahrungswerte von Produktionszeiten und Kapazitätsmöglichkeiten liegen aufgrund den bereits umgesetzten Projekten vor und lassen eine Bauzeitplanung für die Umsetzung der Lärmschutzwand ableiten.



Abb. 15 ERDEN Werkhalle – Produktionsstätte für vorgefertigte Stampflehmelemente; Foto Hanno Mackowitz

In sogenannten „Feldfabriken“ wird eine lokale Produktionsinfrastruktur aufgebaut und mittels lokalem Aushubmaterial Stampflehmelemente maschinell in Vorfertigung hergestellt. Die lokale Produktionsinfrastruktur beinhaltet eine Lagerhalle bzw. ein temporäres Zelt, sowie die Installation der Produktionsmaschine sowie entsprechende Flächen für die Lagerung und Aufbereitung des Rohmaterials. Den Standort der Feldfabrik gilt es vor allem auf Basis logistischer Faktoren zu bestimmen. Idealerweise sind die Transportwege zwischen Aushubdeponie (Rohmaterial für Herstellung der Elemente) sowie der Baustelle aus ökologischen Gründen möglichst kurz zu halten.

Die in Vorfertigung hergestellten Stampflehmelemente benötigen eine Trocknungszeit von ca. 2 Wochen und sind ab diesem Zeitpunkt statisch voll belastbar. Durch Beheizung der Lagerhalle

oder des temporären Zeltes lässt sich die Trocknungszeit beschleunigen. Anschließend können die Elemente mittels LKW direkt zur Baustelle transportiert und versetzt werden. Die Verbindung zwischen den Stampflehmelementen wird mittels Lehmörtel hergestellt. Für ein fugenloses Erscheinungsbild werden die Fugen zwischen den Lehmelementen händisch nachretuschiert.

Der Produktionsprozess wird anhand nachfolgender Bilder bei der Umsetzung der Außenfassade beim Projekt Alnatura Campus in Darmstadt nochmals verdeutlicht.

Materialaufbereitung



Abb. 16 Aufbereitung des lokalen Aushubmaterials zum Rohmaterial zur Herstellung von maschinell vorgefertigten Stampflehmelementen. Foto Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Maschinelle Vorfertigung von Stampflehmelementen



Abb. 17 „Roberta“ – Maschine zur Herstellung von vorgefertigten Stampflehmelementen; Foto Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH



Abb. 18 Zuschnitt der vorgefertigten Stampflehmwand auf Elementlänge mittels Groß-Kreissäge. Foto Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

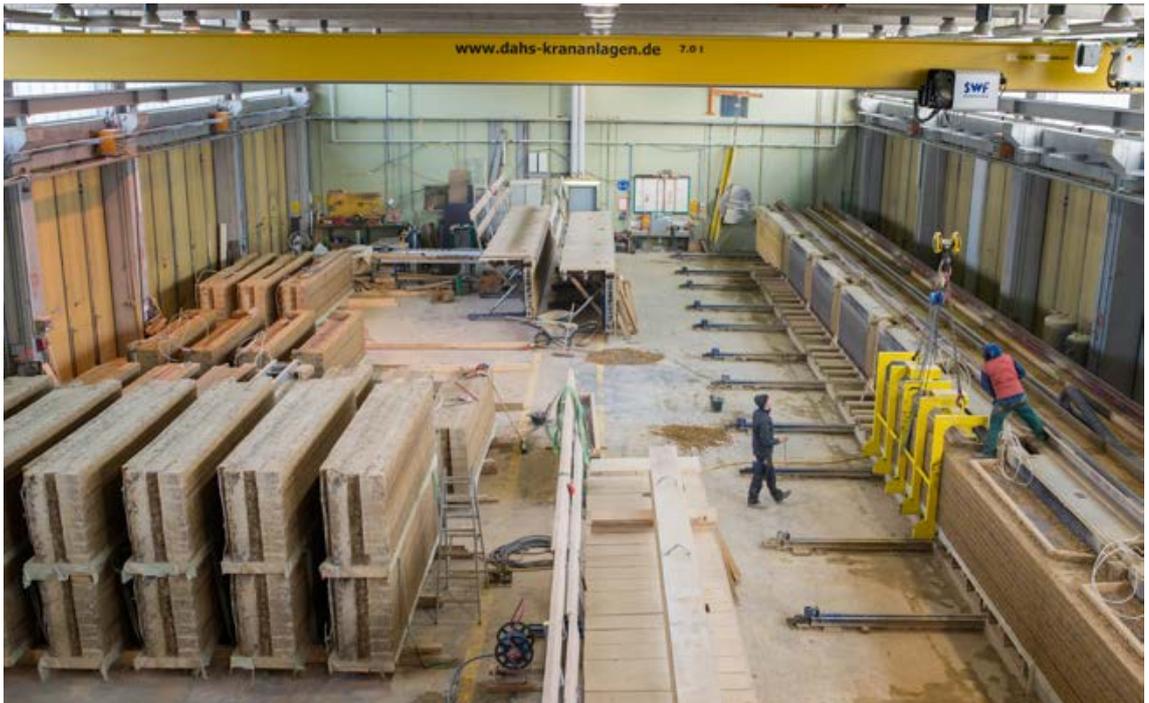


Abb. 19 „Feldfabrik“ in einer angemieteten Lagerhalle, maschinelle Vorfertigung von Stampflehmelementen; Foto Emmanuel Dorsaz / Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Trocknungsprozess



Abb. 20 Trocknungsprozess der Stampflehmelemente in einem temporär eingerichteten Zelt. Foto Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Versatz der Elemente



Abb. 21 Versatz der vorgefertigten Stampflehmelemente mittels Baukran. Foto Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Elemente nach Versatz

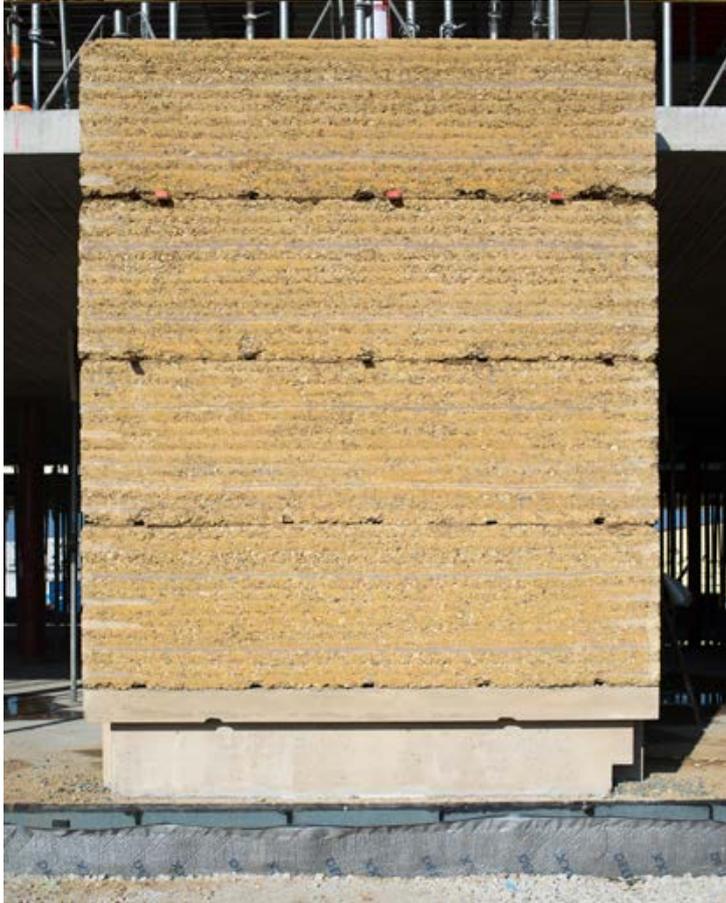


Abb. 22 Versetzte Stampflehmelemente – Retuschierarbeiten der sichtbaren Fugen noch ausständig. Foto Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Fertiggestellte Stampflehm-Aussenfassade



Abb. 23 Fertiggestellte Stampflehm-Aussenfassade, Alnatura Campus Darmstadt, Foto haas cook zemrich STUDIO2050

6.2. Verfahren Stampflehm-Trägerwand

Wie unter Punkt 6.1 verdeutlicht, bevorzugen wir unabhängig des Ausführungsverfahrens, eine maschinelle Vorfertigung von Stampflehmelementen anzuwenden. Beim Verfahren einer Stampflehm-Träger-Variante werden Stampflehmelemente mit einer deutlich reduzierten Wandstärke

gegenüber dem Schwerlastverfahren mit einer Stärke von 45 cm eingesetzt. Die reduzierte Wandstärke wird durch den statischen Ausgleich der Stampflehmwand über die Stützpfeiler (Stahlprofile) erreicht. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass durch die reduzierte Wandstärke kürzere Produktions- und Trocknungszeiten im Bereich der Vorfertigung der Stampflehmelemente erreicht werden. Jedoch ist zu bemerken, dass die Installation der Stahlträger einen höheren finanziellen Aufwand darstellt bzw. und auch aus ökologischer Betrachtungsweise ein Nachteil gegenüber einer Schwerlastwand darstellt, weil in diesem Verfahren keine Tiefgründungen aus Stahl notwendig sind. Der zeitliche Mehraufwand in der Erstellung der Tiefgründen zeigt sich im erhöhten finanziellen Aufwand, jedoch ist der Bauablauf durch die mögliche Abstimmung mit der Vorfertigung der Stampflehmelemente sehr gut in Einklang zu bringen.

6.3. Verfahren Stampflehm-Schwerlastwand

Das Verfahren der Stampflehm-Schwerlastwand basiert auf einem statischen Konzept der Stabilisierung durch das Eigengewicht. Bei einer deutlich höheren Wandstärke gegenüber der Variante Stampflehm-Trägerwand von 100 - 120 cm (Unterschiede je Abschnitt) sind keine Tiefgründen notwendig. Es ergeben sich längere Produktions- und Trocknungszeiten der vorgefertigten Stampflehmelemente, jedoch kann der Produktionsablauf soweit gesteuert werden, dass fortlaufend Stampflehmelemente zur Baustelle transportiert und versetzt werden können. Neben dem ökologischen Vorteil, Verzicht auf Tiefgründen (Eckpfeiler aus Stahl), bietet sich die höhere Wandstärke ideal an, um auf der Wellblechabdeckung eine Photovoltaikanlage zur Erzeugung von erneuerbarer Energie (Solarstrom) zu installieren. Die ermittelte Anlagegröße einschließlich Ertragsprognosen ist unter 7.3 detailliert erläutert. Abschließend gilt es zu bemerken, dass gerade nochmals aus ökologischer Sicht, durch die Anwendung einer Stampflehm-Schwerlastwand, die lokal mehr als ausreichend vorhanden Ressourcen (Aushubmaterial zur Herstellung der Stampflehmelemente) ideal genutzt werden können. Der benötigte Schotter lässt sich auch durch recyceltes Material wie z.B. Ziegelbruch ersetzen. An dieser Stelle würde es sich anbieten, eine Ökobilanz beider Verfahrenstechniken zu erstellen, um eine fundierte Aussage als Entscheidungsbasis der ökologischen Aspekte zu treffen.

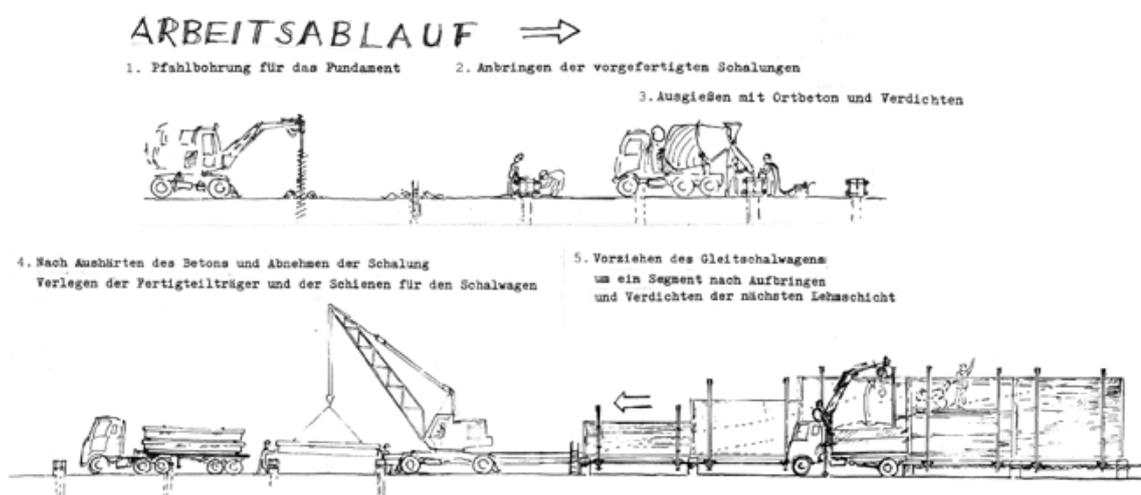


Abb. 24 Skizze von Martin Rauch zum Prinzip des Arbeitsablaufs beim Bau einer Schwerlastwand in der Bauweise Stampflehm Vor-Ort-Produktion in wandernder Verschalung

6.4. Verfahren Wellerlehm-Schwerlastwand

6.4.1. Traditionelle Methode

Der Lehmwellerbau ist eine historische, ursprünglich bäuerliche, schalungslose Volksbauweise. Vor allem in Gebieten mit lokalen Lösslehmvorkommen hat sich diese Technik verbreitet. Wellerlehm (mit Stroh armierter Lehm) wird traditionell in Schichten manuell aufgesetzt. Die Schichten

lässt man einige Tage anziehen. Danach werden sie durch Abstechen mit scharfem Spaten manuell nachgearbeitet und begradigt.

Lehmweller besteht aus einem Lehm-Strohgemisch, welches vor Ort hergestellt wird. Das Gemisch wird direkt neben der Baustelle lagenweise aufgeschichtet und mit Stroh versetzt. Das Mischen erfolgte durch Stampfen mit den Füßen. Danach musste die Mischung ca. 24 Stunden ruhen (Fachbegriff: ‚mauken‘). Dann konnte die Wand gesetzt werden. Dem Wellermeister wurden die Lehmfladen mit der Mistgabel zugereicht. Dieser versetzte sie im Verband und verdichtete die Masse. Ein Wellersatz erreichte durchschnittlich eine Höhe von 60 cm sowie eine Breite von 50–100 cm.

Das Versetzen der Lehmfladen erfolgte mit einem Überstand von ca. 10 cm. Nach einer entsprechenden Trocknungszeit erfolgte das lotrechte Abstechen der Wand mit einem Wellerspaten. Dadurch entstand die typische Oberflächenstruktur von waagrecht abgeschnittenen Strohhalmen. In Abhängigkeit der Wetterlage konnte nach ca. 3-4 Wochen mit dem nächsten Wellersatz begonnen werden.

Lehmgiebel mit Höhen von bis zu 12 Metern sind keine Seltenheit.

6.4.2. Verfahrenstechnik zur Erstellung einer Lehmweller-Schallschutzwand

6.4.2.1. Laufende Vor-Ort-Produktion (mit 'wandernder' Verschalung)

Für die Lehm-Lärmschutzwand an der Autobahn A14 kann Lehm aus der Kiesgrube Schmelzer und/oder aus dem Autobahnaushub genommen werden, das Stroh dazu von regionalen Bauern.

Das Herstellen der Lehmmasse erfolgt auf einer Freifläche mit einem Radlader. In eine Schalung wird die Lehmmasse mittels Radlader gefüllt und maschinell mit einem Vibrationsstampfer verdichtet. Der Einbau erfolgt in horizontalen Lagen in einer Schalungshöhe von 1,50 m. Sobald die Schalung befüllt ist, kann das nächste Schalelement aufgesetzt werden. Das zeitgleiche Arbeiten von mehreren Teams, die jeweils aufeinander zuarbeiten, ist möglich.

- Ein Team besteht aus 4 Arbeitern. An großer Maschinentchnik werden pro Team ein Radlader und 2 fahrbare Hebebühnen benötigt.
- Die Erstellungszeit beträgt für 50 m³ ca. 3 Tage.
- 1,0 m³ fertige Wellerwand benötigt ca. 2,0 t Lehm.
- Der Erstellungspreis für 1,0 m³ Wellerlehm beträgt momentan 510,00 € / m³.
- Die erstellten Bereiche müssen vor Regen geschützt werden bis die Dachabdeckung montiert wird.

6.4.2.2. Logistisch weiterentwickelte Methode mit vorgefertigten Elementen (vorzugsweise mittels Wellerlehmpresse)

Wir haben an Hand einer Probewand ein Hybridverfahren für die Herstellung von vorgefertigten Wellerlehmblöcken getestet. Es handelt sich hierbei um ein neues, von uns für umfangreiche Wellerlehmgebäuden entwickeltes Verfahren.

Wellerlehm wird in einem ersten Schritt in standardisierten Verschalungen zu vorgefertigten Blöcken gepresst. Nach Ausschalung und Trocknung werden diese Blöcke mit Lehmmörtel zu einer Mauer aufgebaut. und anschließend durch Abfräsen nachgearbeitet. Das ermöglicht durch effizientere Logistik mit vergleichsweise wenig Handarbeit großtechnische Anwendbarkeit.

Herkömmlich

Nicht existent, bzw. vollständig manuelle Prozedur.



Abb. 25 Drei Videostandbilder, die das manuelle Begradigen von Wellerlehm durch 'Abstechen' mittels eines speziellen Abstechspatens zeigen (traditionelles Verfahren). Video Lehmbau Lovis UG

Neuerung

Eine Neuerung stellt das Verfahren zur Produktion von vorgefertigten standardisierten Wellerlehmmodulen in Verschalungsmodulen dar. Dies kann vor Ort in einer 'Feldfabrik' oder in einer Lehmgrube in der näheren Umgebung geschehen. Die manuelle Vorfabrikation von Wellerlehmblöcken hat sich im Rahmen des Baus der Probewand als effektiv herausgestellt, da viele Verschalungsmodule in den geforderten Standardmaßen gleichzeitig befüllt werden können, was eine erhebliche logistische Verbesserung im Hinblick auf umfangreiche Bauvorhaben darstellt. Unser Ziel ist, die Vorfabrikation von Standard-Wellerlehmblöcken mechanisiert mittels einer von uns entwickelten Großpresse durchzuführen (siehe 6.4.3 auf Seite 44).

Faktor Trocknungszeit

Die Trocknungszeit stellt bei der traditionellen Wellerlehmbauweise einen Verzögerungsfaktor dar, da die feuchten Lagen nur eine gewisse Höhe haben dürfen, ehe sie so aushärten und die nächste Schicht aufgetragen werden kann. Die Vorfertigung von Wellerlehm-Elementen in Schalungen stellt in diesem Zusammenhang eine erhebliche logistische Verbesserung dar, da die Elemente zur Bauzeit bereits ausgehärtet sind und ohne weitere Verzögerung verbaut werden können.

Christian Hansel hat in einem Vorversuch eine Testwand errichtet (siehe Abb. 59 auf Seite 69) bei der Wellerlehm in sehr zähem, aber noch gerade plastischen Zustand in einer Schalung eingestampft wurde.

Das Einstampfmaß betrug $L=3,00\text{ m}$, $B=0,50\text{ m}$, $H=1,50\text{ m}$.

Das Ausschalen erfolgte nach 2 Tagen. Es gab keine anschließende Formveränderung.

Durch das lagenweise Einbringen in Höhen von ca. 15 cm und anschließende Verdichten wurde genügend Wasser freigesetzt, um einen homogenen gleichmäßigen Strohlehmkörper zu erhalten.



Abb. 26 Prof. Heiner Lippe prüft noch nicht ausgeschaltete Wellerlehmblöcke die im Rahmen des Baus der Probewand hergestellt worden und zwecks Akustikmessungen an der TH Lübeck vorgesehen sind. Foto Ute Reeh

Sägetests mit Wellerlehm

Das Sägen von Wellerlehmblöcken stellt eine Innovation dar. Sägen ermöglicht zusätzliche Anpassungen der Maße von Wellerlehm-Bauelementen, z.B. für die Integration der unarmierten 'Bienenlehm'-Elemente in die Wand. Sägen von Wellerlehm ermöglicht außerdem – falls erforderlich – das mechanisierte Erstellen von standardisierten Blöcken mittels einer Großpresse. Beim Sägen werden außerdem die Strohhalme vertikal durchtrennt und begünstigt deren Funktion als erosionsreduzierende Maßnahme.



Abb. 27 Christian Hansel führt mit einer Motorsäge einen Sägetest von Wellerlehm durch. Foto Lehmbau Lovis UG

6.4.3. Großtechnische Fabrikation Wellerlehm

Eine weitere Verbesserung für großtechnische Anwendung wäre die mechanisierte Herstellung standardisierter Wellerlehmblöcke mittels einer speziell zu diesem Zweck entwickelten Presse. Die Presse kann von existierenden hydraulischen Strohballen- oder Abfallpressen abgeleitet und angepasst werden. Eine solche Presse ist derzeit in Zusammenarbeit zwischen Martin Rauch, dem Zentrum für Peripherie und Maschinenbauern der TH Lübeck in Entwicklung. Logistische Verbesserung ist die kurze Produktionszeit mit vergleichsweise hohem Ausstoß. Dabei könnten die Blöcke gesägt werden, wodurch auch das Abfräsen entfielen.

Um in vergleichsweise kurzer Zeit signifikante Wandlängen zu produzieren (mindestens Hunderte von Metern von bis zu 7 m Wandhöhe oder auch mehr) werden teilmechanisierte Verfahren angewendet und eine entsprechende Logistik aufgebaut (Stichwort: „Feldfabrik“), bei der materialspezifische Gegebenheiten (z.B. Trocknung) berücksichtigt sind. U.a. Pressen und Sägen von Wellerlehmblöcken stellen eine vollkommen neue Technik dar.

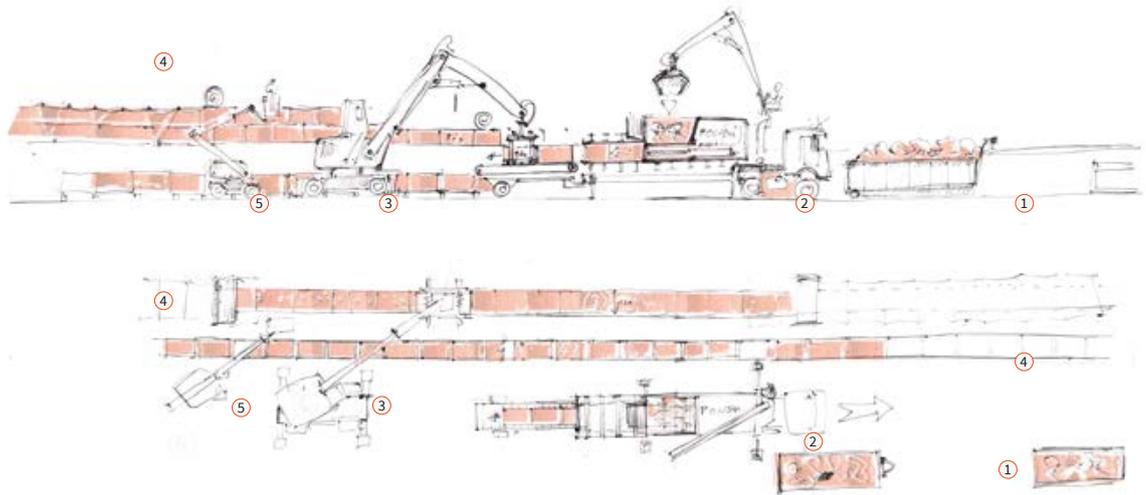


Abb. 28 Skizze zur Laufenden-Vor-Ort-Produktion einer Wellerlehmwand in großtechnischem Verfahren.
(1) Die aus Lehm und Stroh gemischte Wellerlehmmasse wird mit Absetzcontainern auf die Baustelle geliefert.
(2) Mittels Greifkran wird die Masse in die mobile Wellerblockfertigungsanlage gefüllt und zu großformatigen Blöcken gepresst.
(3) Ein mobiler Kran mit speziell entwickelter Greifzange setzt die Blöcke abwechselnd auf das vorbereitete Fundament/die Wand und in eine Reihe parallel vor der Wand zum Trocknen.
(4) Die bereits gefertigte Wand sowie die vorgefertigten Blöcke werden mit einem speziellen Wetterschutzsystem geschützt.
(5) Angepasste Arbeitsbühnen ermöglichen fortlaufend die Kontrolle und Nachbearbeitung der Wandoberfläche.
Eine horizontale Abdeckung wird auf der fertigen Wand montiert. Hierzu bieten sich u.a. Solarpaneele an.
Zeichnung Martin Rauch



Abb. 29 Besichtigung einer existierenden fahrbaren Großpresse (in diesem Fall eine für Abfälle) durch Mitglieder unseres Teams zwecks Evaluierung des Funktionsprinzips und der Anwendbarkeit für Wellerlehm (Videostill Ute Reeh)



Abb. 30 Die "Presskammer", der Großpresse durch den Ausschubkanal gesehen (Videostill Ute Reeh)

Mögliches Verfahren

Eine fahrbare Wellerblockpresse mit Ladekran fährt parallel zur Lärmschutzwand. Er setzt die Wellerblöcke auf das Fundament, bzw. die begonnene Lärmschutzwand mörtelfrei auf. Eine zweite Reihe Wellerblöcke wird neben der Wand zum Trocknen (ca. 1 Woche) aufgesetzt. Im zweiten Durchgang werden dann jeweils zwei Lagen gesetzt. Auf diesem Weg lassen sich auf ganzer Länge 5 Meter Höhe in 4 Sätzen errichten. Die Wellerlehm-Oberfläche wird mittels umfunktionaler Fräsmaschinen aus dem Straßenbau abgefräst.

6.4.4. Prozessparameter und Kinematikstudien für die Konzipierung einer Maschine zur Herstellung von Blöcken aus Wellerlehm

Die vollständige Studie im Rahmen einer Abschlussarbeit an der TH Lübeck finden Sie im Anhang auf Seite 203.

Aus den Vorüberlegungen, den Besichtigungen und Gesprächen wurde beschlossen, die Konzeption einer Maschine die Wellerlehmblöcke erstellen könnte, grundsätzlich zu überdenken. Dazu sind dann unter maßgeblicher Mitwirkung des Kollegen Prof. Dr. Nils Kohlhase und seines Studierenden und Bachelorabsolvierenden Mohamad Saleh, beide aus dem Fachbereich Maschinenbau und Wirtschaft der Technischen Hochschule Lübeck, folgenden grundsätzliche Überlegungen an der TH Lübeck erstellt worden. In vielen Arbeitssitzungen am Bildschirm, vor Ort und im Labor und an den Prüfständen der Materialprüfanstalt Schleswig-Holstein, gemeinsam mit den weiteren Studierenden Inken Bork, Urs Seel sowie Paul Tschense sowie Prof. Heiner Lippe sind Erkenntnisse gesammelt worden, die hier ihren Niederschlag finden. Diese sind als weiterer Baustein der Machbarkeitsstudie zur Lehm-Lärmschutzwand an der A14 zu betrachten, geben hier eine weitere Orientierung.

6.4.5. Erster Pilotversuch Wellerlehmpresse

Nach zwei Jahren Vorarbeit machten wir am Samstag, 13. März 2021 als Pilotversuch die ersten Funktionstests mit dem Kern einer Wellerlehmpresse im Maßstab 1:4 auf dem Gelände der PS Kieswerke Perleberg.



Abb. 31 Ein Wellerlehmblock wird nach dem Kompaktierungsvorgang aus der Kammer herausgedrückt. Videostill Ute Reeh

Die Versuche erfolgten mit Wellerlehm, für die einerseits Lehm aus der Region (PS Kieswerke Perleberg) verwendet wurde, sowie auch rezyklierter Lehm, der von einem ehemaligen, 750 Jahre alten Bauernhaus aus Thüringen stammt und der von Thomas Stulier zur Verfügung gestellt wurde. Damit konnte auch die Recycling-Fähigkeit des Materials in dieser Anwendung überprüft und nachgewiesen werden.

Die Zielrichtung dieses Pilotversuchs war der Hochbau mit großtechnisch gefertigten Wellerlehm-Bauelementen zwecks Modernisierung der Baugestaltung mit Wellerlehm.



Abb. 32 Ein fertiger Wellerlehmblock im Maßstab 1:4 zu den geplanten Dimensionen. Die Ungleichmäßigkeit der Materialdichte – wie im Bild zu erkennen – soll in der Endanwendung durch wesentlich höheren Druck ausgeglichen werden. Videostill Ute Reeh

Team:

- Maschinenbau: Kay Hoffmann, Laaslich
- Konstruktion: Michael Schmiel
- Maschinenpark: Steffen Schmelzer, Wittenberge
- Vorbereitung und Material: Henry Krüger, Perleberg
- Idee zur Technologie: Martin Rauch, Schlins
- Ursprüngliche Idee: Ute Reeh, Düsseldorf, Nebelin
- Vortests: Nils Kohlhase, Mohamad Saleh, TH Lübeck
- Materialprüfung: Prof. Heiner Lippe, TH Lübeck
Inken Bork, TH Lübeck
- Mitarbeit: Burghard Behrendt, Nebelin
Thomas Stulier, Langensalza

Messergebnisse des ersten Pilotversuchs Wellerlehmpresse

Der erste Test war vielversprechend. Wellerlehm und Weller-Leichtlehm können in einer Presse zu verbaubaren Lehm-Fertigbausteinen gepresst werden. Die Festigkeit des getrockneten Materials ist höher als die von traditionellem Wellerlehm.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

- Je geringer die Feuchtigkeit der Lehm Masse ist, desto höher muss die Presskraft sein
- Je höher die Bindigkeit der Lehm Masse ist, desto mehr Feuchtigkeit darf sie enthalten
- Je magerer der eingesetzte Lehm ist, desto höher muss der Pressdruck sein

Mit der Hand – d.h. traditionell – verarbeiteter Wellerlehm hat normalerweise eine Druckfestigkeit von ca. 1 N/mm².

Unsere Tests im März 2021 zeigen bei einem Pressdruck von 1,44 N/mm² deutlich höhere Druckfestigkeiten.

Folgende Druckfestigkeiten wurden an Proben vom Pilotversuch an der TH Lübeck gemessen. Damit zeigt sich dass die Druckfestigkeit der gepressten Wellerlehmblöcke mehr als ausreicht, um hoch zu bauen (die Höhe ergibt sich aus der Druckfestigkeit und den jeweils anzuwendenden Sicherheitsvorschriften).

| | L | B | H | Gewicht 1 | Gewicht 2 | Gewicht 3 | Volumen | Dichte trocken | Kraft | Druckfestigkeit |
|----------------------|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------|-------------------|
| | mm | | | kg | | | mm ³ | kg/m ³ | kN | N/mm ² |
| Stempel-seite | 208 | 200 | 201 | 14,8 | 14,8 | 13,7 | 0,0083616 | 1642,03 | 129,0 | 3,23 |
| Vorn | 220 | 201 | 201 | 15,2 | 15,2 | 15,15 | 0,0088882 | 1704,5 | 93,0 | 2,3 |

Tabelle 4 Nebeliner Lehm

| L | B | H | Gewicht 1 | Gewicht 2 | Gewicht 3 | Gewicht 4 | Gewicht 5 | Volumen | Dichte trocken | Kraft | Druckfestigkeit |
|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------|-------------------|
| mm | | | kg | | | | | mm ³ | kg/m ³ | kN | N/mm ² |
| 202 | 201 | 200 | 14,78 | 14,38 | 14,26 | 14,22 | 14,21 | 0,0081204 | 1749,9 | 204 | 5,1 |

Tabelle 5 Recyclinglehm aus Thüringen aus dem Jahr 1711

7. Abdeckung

Die Abdeckung erfolgt in allen Varianten mittels Stahl-Trapezblech (z.B. 150 x 50 x 45 mm, Stärke 0,6 mm mit einer 25 µm Farbbeschichtung) mittels entsprechenden Kalotten und Verschraubung in eine leiterförmige Balkenstruktur auf der Wand.

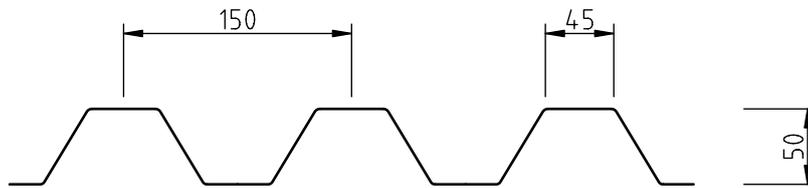


Abb. 33 Trapezblech. Zeichnung Sebastian Bertalan

7.1. Variante Hybridwand: Stampflehm/Stahlträger

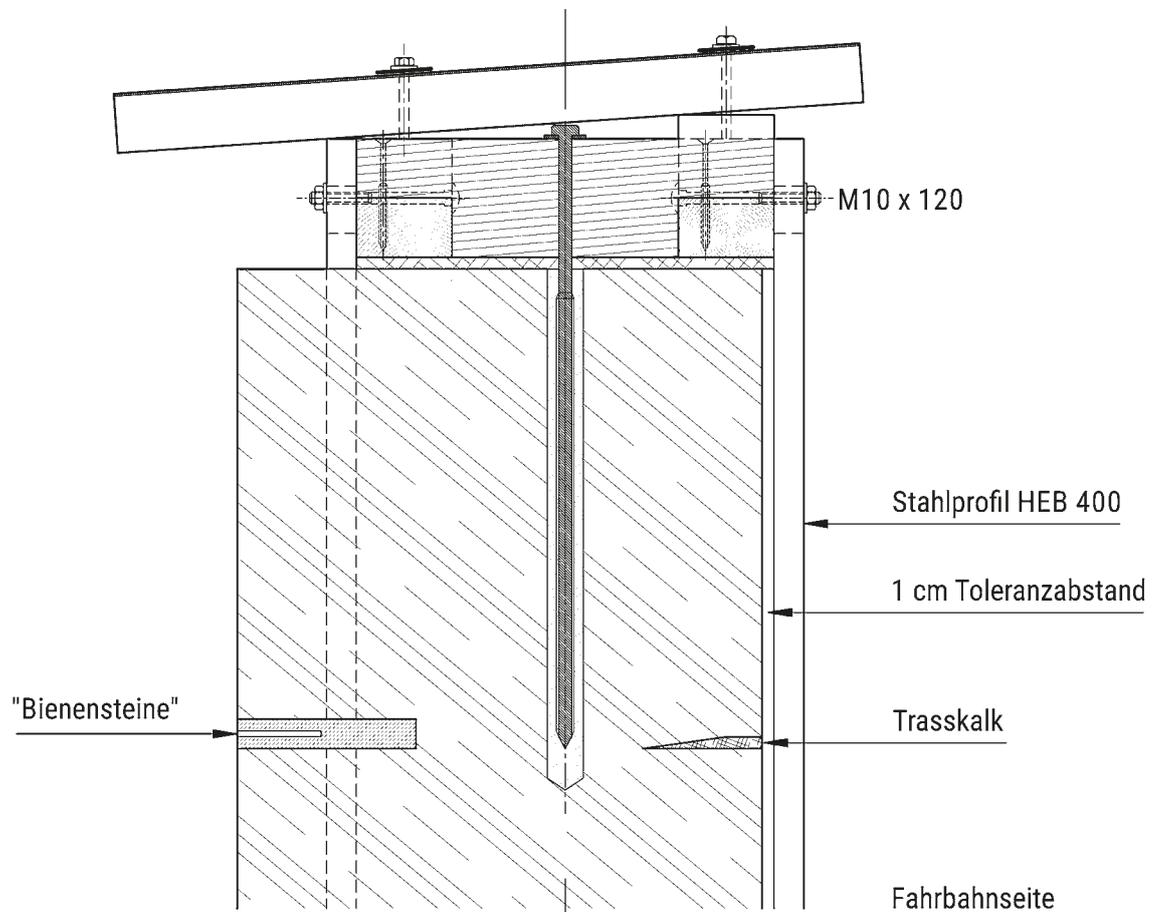


Abb. 34 Querschnitt-Darstellung der Abdeckungsbefestigung in der Hybrid-Variante Stampflehm/Stahlprofile. Zeichnung Sebastian Bertalan

Der Abschluss der Wand am oberen Ende erfolgt durch leiterförmig miteinander verbundene Balken (Fichte Vollholz) und Trasskalk-Lehm-Verguss der Zwischenräume. Die Balken sind durch das Blech ausreichend geschützt und hinterlüftet. Die Balken sind links und rechts mit den Stahlsäulen verschraubt und in der Mitte mit vier Gewindestangen verankert. Die Bohrung dazu ist 20 mm und ca. 40 cm tief. Diese Gewindestangen werden mit Sikagraut oder einem anderen Zement-Vergussmörtel im Lehm vergossen. Das Bohrloch wird dazu ausgeblasen und bis zur Hälfte Sikagraut gefüllt. In diese wird dann eine Gewindestange M12 eingesteckt. Nach dem Aushärten kann die Mutter angezogen werden. Martin Rauch (Lehm Ton Erde, Schlins, Österreich) hat das schon oft ausgeführt und technisch getestet. Im Zuge der Zulassung müsste noch einmal dieser Test gemacht werden. Dabei wird dann die exakte Tiefe der Bohrung bestimmt.

7.2. Variante Schwerlastwand (Stampflehm und Wellerlehm)

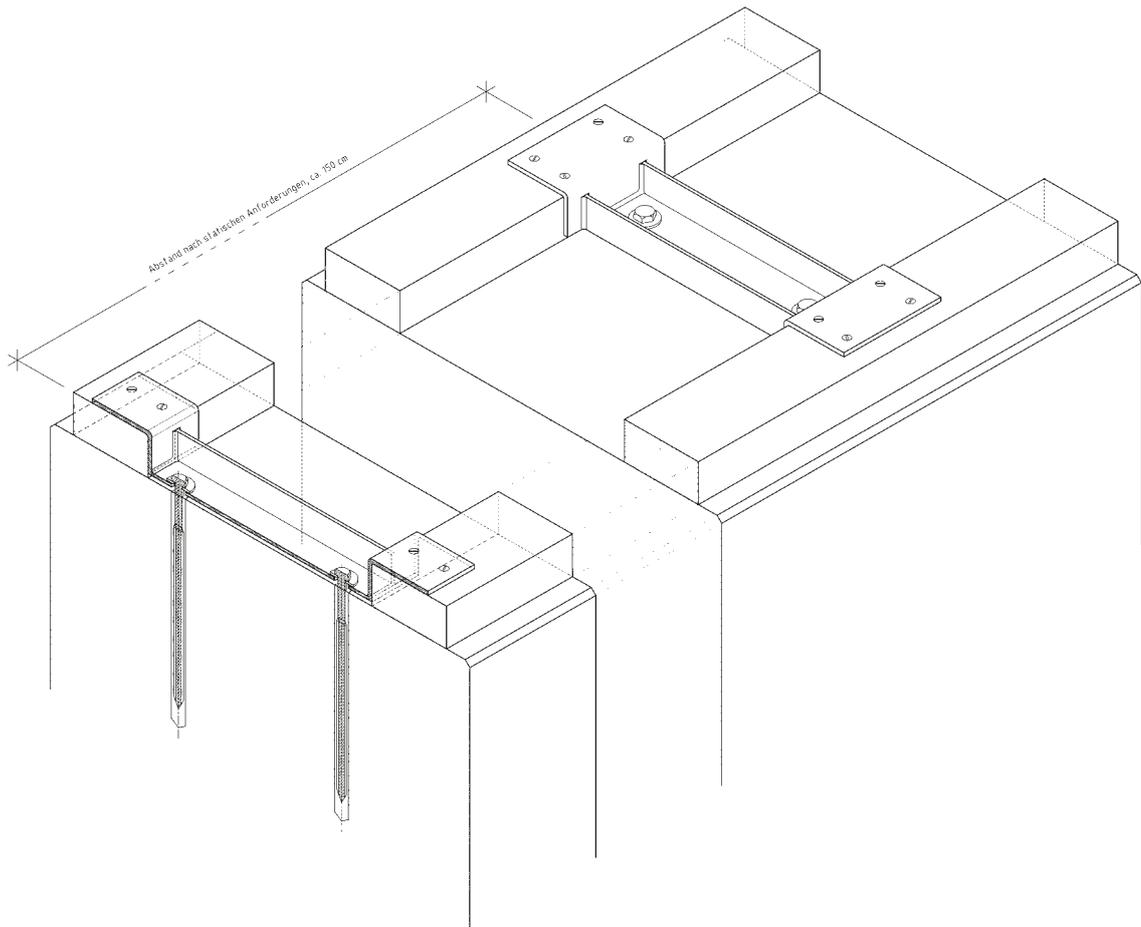


Abb. 35 Isometrische Darstellung der Abdeckungsbefestigung in der Variante Schwerlastwand (Stampflehm/Wellerlehm). Im Fall der Wellerlehmwand von 5 m Höhe beträgt die Wandstärke zur Bauzeit 120 cm, im Fall der Schwerlast-Stampflehmwand 100 cm. Zeichnung Sebastian Bertalan

Das Abdeckungsprinzip entspricht weitgehend dem oben beschriebenen für die hybride Stampflehm/Stahlprofil-Variante, und zwar gleichermaßen für Stampflehm- und Wellerlehmwand (siehe dazu auch die Pläne im Anhang).

7.3. Photovoltaik

Die Lehmbauwände einschließlich der angedachten Abdeckung einer Wellblechabdeckung bieten sich ideal an, um die vorhandenen Flächen für die Erzeugung von nachhaltiger Energie (Solarstrom) mittels einer Photovoltaik-Anlage zu bestücken.

Aufgrund des Verlaufs der Autobahn bzw. der Lärmschutzwand entlang der Nord-Südachse wird sich voraussichtlich eine Kombination aus Ost-West-Ausrichtung mit einer Neigung der Solarmodule von max. 15 Grad anbieten. Die angedachte Neigung ist ausreichend um die notwendige Selbstreinigung der Module durch Regen zu gewährleisten. Die gesamt nutzbare Lehmbauwandlänge (Abschnitt A, C, D, E) beträgt 5.300 Meter und bietet nach erster Grobschätzung Platz für ca. 3.100 Solarmodule in der Abmessung von 168 x 99 cm und einer Leistung von 330 Wp je Solarmodul. Dies entspricht in etwa einer möglichen Gesamtleistung von 1,023 Megawatt-Peak und einem konservativ berechneten Jahresertrag von ca. 900.000 Kilowattstunden (kWh). Mit der erzeugten Leistung können ca. 180 Haushalte (5.000 kWh pro Jahr) mit erneuerbarer Energie versorgt werden. Die Baukosten sind aus derzeitiger Sicht aufgrund einiger noch nicht geklärter Eckpfeiler (Einspeisepunkt, etc.) sehr vage und können mit ca. EUR 650,00 bis EUR 900,00 pro Kilowatt-Peak installierter Leistung beziffert werden. Die Baukosten für die gesamte Länge betragen daher laut Erstschätzung ca. EUR 700.000 – EUR 950.000,00.

8. Erstellung einer Lehmprobewand in Nebelin

8.1. Zielstellung

Der Bau der Test- und Demonstrationswand in Nebelin hat im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt:

1. Die Vergleichbarkeit von verschiedenen Lehmbautechniken innerhalb einer Wand in Bezug auf Herstellung, Materialzusammensetzung, Vorfertigung, Verarbeitung, Wetterbeständigkeit, Naturschutz, Ästhetik.
2. Die Gewinnung von Partnern, den Bewohnern von Nebelin, interessierten Menschen aus der Region, Politikern des Landkreises und des Landes, und der Presse die Bautechnik vorzustellen (wie so ein Bauwerk konkret aussehen würde), bzw. Menschen von der Effektivität, der Naturverbundenheit und Schönheit einer Lehmabwand zu überzeugen. Dieser Punkt war wesentlich für die breite Akzeptanz auf allen Ebenen und das bemerkenswert große Interesse an dieser Art einer Lärmschutzwand.



Abb. 36 Die Präsentation und Einweihung der Probewand am 5. Juni 2020. V.l.n.r.: Matthias Behrendt, Ortsvorsteher von Nebelin; Ute Reeh, Zentrum für Peripherie; Prof. Heiner Lippe, TH Lübeck. An der Probewand links der Stampflehmteil mit integrierten 'Bienensteinen' und an zwei Stellen 'Bienenlehm'; rechts der Wellerlehmteil mit integrierten 'Bienenlehm'-Elementen. Foto Dieter Günnewig

8.2. Beschreibung

Die Testwand ist in verschiedenen Lehmbautechniken errichtet worden. Sie umfasst zwei Bauabschnitte: einen Stampflehmabschnitt und einen Wellerlehmabschnitt. Die Länge der Probewand beträgt 8,00 m, die Breite 0,50 m, und die Höhe 2,20 m. Die Gründung erfolgte mittels Betonfundament von 0,80 m Tiefe und einem Betonsockel von 0,30 m Höhe.

Folgende Lehmmischungen, bzw. Aufbaumethoden wurden verwendet, bzw. angewendet:

- gestampfter vorgefertigter Wellerlehm
- traditioneller schalungsloser Wellerlehm
- gestampfter vorgefertigter purer Lehm
- gestampfter purer Lehm
- Stampflehm in einer Schalung nach dem System von Martin Rauch

Damit sind die projektierten Bauprinzipien und Varianten praktisch ausprobiert und testweise realisiert worden.

8.2.1. Herstellung und Einbau von gestampften Wellerlehmblöcken

Maße der vorgefertigten Wellerlehmbauteile: Länge: 1,20 m, Breite 0,50 m Höhe: 0,50 m

Verwendung von Ortlehm aus dem Kieswerk Schmelzer, Stroh von der Nebeliner Agrargenossenschaft. Mischen des Wellerlehms vor Ort im Kieswerk auf einer Freifläche mittels Radlader, Stampfen der Blöcke in eine vorgefertigte Schalung.

Manuell: Ausschalen und Trocknung der Blöcke auf dem Kieswerkgelände.

Der Transport der Blöcke erfolgte mittels eines Containerfahrzeugs auf die Baustelle. Eingebaut wurden die Blöcke mit einem kleinen Radlager in ein Lehmmörtelbett.

Die Wellermasse für die oberste Lage, die im traditionellen, manuellen Verfahren aufgetragen worden ist, wurde in gleicher Weise hergestellt und direkt auf die Baustelle geliefert. Am nächsten Tag erfolgte der Fortbau im schalungslosen Verfahren. Am 3. Tag erfolgte das Begradigen der Mauerform mit einer Mauerwerkssäge manuell. Einige Tage später erfolgte das Nachstechen der Oberfläche mit dem Abstechspaten.



Abb. 37 Aufbau des Wellerlehmabschnitts der Probewand aus vorgefertigten Blöcken. Links im Bild eine Verschalung zur manuellen Herstellung vorgefertigter Wellerlehmblöcke. Rechts im Bild die Lehmbauer Christian Hansel und Henry Krüger im Gespräch, hinten Burghardt Behrendt aus Nebelin (Videostandbild Daniel Beltrán).

- Wie von Christian Hansel mit Hilfe des Achterlingstests ermittelt, hatte der verwendete Lehm eine Bindigkeit von ca. 50g/cm².
- Für die Wellerlehmischung verwendeten wir Stroh mit einer Halmlänge von 20-30 cm.
- Nach Gewicht betrug der Strohanteil der Wellerlehm-masse etwa 2 Masseprozent. Dabei betrug das Volumenverhältnis Lehm/Stroh ca. 1:1.

Fazit zum Wellerlehmteil

1. Das Mischen der Masse direkt im Kieswerk mittels Radlader ist sehr effektiv. Es kann in sehr kurzer Zeit eine große Menge Wellerlehm-Masse hergestellt werden.



Abb. 38 Mischen von Wellerlehm-Masse mit einem Radlader im Kieswerk (Videostandbild Daniel Beltrán)

2. Das Vorfertigen von Lehmblöcken in den Maßen 1,20 m x 0,50 m x 0,50 m ist prinzipiell in sehr guter Qualität möglich. Das manuelle Stampfen ist jedoch aufwändig und daher ineffektiv.
3. Das Versetzen vorgefertigter Wellerblöcke mittels Kleinradlader oder Minibagger ist problemlos möglich. Auf einer Großbaustelle wäre stattdessen ein fahrbarer Kran effektiver. Mit dieser Methode lassen sich in kurzer Zeit längere Wandabschnitte aufbauen. Nach derzeitigem Stand muss auf jede Lage eine dünne Schicht Lehmmörtel manuell aufgetragen werden, um die Bauelemente zu justieren und miteinander zu verkleben.
4. Die Anwendung der traditionellen Technik ist aus Zeitgründen, bzw. logistisch ineffektiv.

Eine alternative (effektive) Möglichkeit der Erstellung einer Lehmwellerwand wäre das Stampfen der Masse in einer Schalung, wobei die Wand homogen in einem Stück hergestellt wird. In der geforderten Dimension der Schallschutzwand ist dies noch nie gemacht worden. Mit dem Erstellen einer prototypischen Musterwand in realer Größe könnte dies erprobt werden. Zu erproben wären für diese Baumethode die Vorhaltezeiten der Schalung, die Trocknungszeiten, sowie die Schwindhöhen.

8.2.2. Bau des Stampflehmabschnitts

Der Bau des Stampflehmabschnitts erfolgte nach der Fertigstellung des Wellerlehmabschnitts in Rohform. Es wurde die Verschalung angebracht und die Stampflehm-masse in Schichten aufgetragen. Dabei wurden auf der Vorder- und an der sichtbaren Stirnseite „Bienensteine“ aus gebranntem Lehm, auf der Rückseite Trasskalkeinlagen als Erosionsbremsen eingefügt.



Abb. 39 Stampfen einer neuen Schicht Stampflehm in der Verschalung mittels pneumatischer Verdichtern (Videostandbild Daniel Beltrán)



Abb. 40 Stampfen mittels eines pneumatischen Stampfers. Links im Bild ist der Anschluss zum Wellerlehmabschnitt der Testwand zu sehen (Videostandbild Daniel Beltrán).

Fazit zum Stampflehmteil

Die Eignung von Stampflehm für hohe selbsttragende Wände ist schon länger bekannt und war nicht primär Zweck der Probewand. Die Integration von ‚Bienensteinen‘ stellt eine neue, von Ute Reeh vorgeschlagene Variante einer von Martin Rauch bereits erprobten Technik zur Erosionskontrolle dar, nämlich nichterdierende Schichten zu integrieren. Der Bau der Probewand hat auch gezeigt, dass sich Wellerlehm und Stampflehm problemlos kombinieren lassen.



Abb. 41 Die fertige Probewand; im Vordergrund der Stampflehmabschnitt mit Schichten von gelochten 'Bienensteinen' aus gebranntem Ton, die gleichzeitig auch als 'Erosionsbremsen' gegen herablaufendes Regenwasser dienen. Foto Ute Reeh

Es wird sich ein gewisser Bewitterungsverleiß einstellen. An der Probewand in Nebelin wird man im nächsten Frühjahr diesbezüglich eine Tendenz ablesen können. Um den Bewitterungsverleiß auszugleichen ist die Wand auf allen Seiten 10 mm stärker ausgelegt als der Betonsockel (siehe dazu auch „10. Dauerhaftigkeit“ auf Seite 62).

9. Formgebung der Lehmlärmschutzwand

9.1. Statisch relevante Geometrie

Die maßgebende statische Beanspruchung der Lehmlärmschutzwand erfolgt aufgrund von Wind. Bedingt durch die Wandgeometrie kommt es hierbei zu erhöhten Druck- und Sogeinwirkungen in den Randbereichen der Konstruktion. Mittels geometrischer Anpassungen der Höhe und Neigung der Wand lässt sich die Beanspruchung in diesen Bereichen reduzieren, sodass eine über die Länge gleichmäßige Ausnutzung der Wandkonstruktion ermöglicht werden kann. Ferner lässt sich über die Formgebung eine für die Besiedelung günstige Mikroklimata schaffen sowie der gegliederte Raum ästhetisch und funktional mit einer weiteren Nutzung versehen.

Herkömmliche Formgebung

Lärmschutzwand verläuft exakt parallel zur Fahrbahn.

Innovation

An den Enden einer Lärmschutzwand aus Lehm folgt die Form den statischen Vorgaben hinsichtlich den erforderlichen Dicken der Wand und deren möglichen Reduktion durch eine Zickzackform. Dies fängt die in diesen Bereichen höhere Beanspruchung durch Wind auf. Zugleich schafft die Form für die Besiedelung günstige diverse Mikroklimata. Die Form bewirkt darüber hinaus einen gegliederten Raum, der ästhetisch anspricht.



Abb. 42 Entwurf von Ute Reeh für die jeweiligen Enden einer Schwerlast-Lehmlärmschutzwand

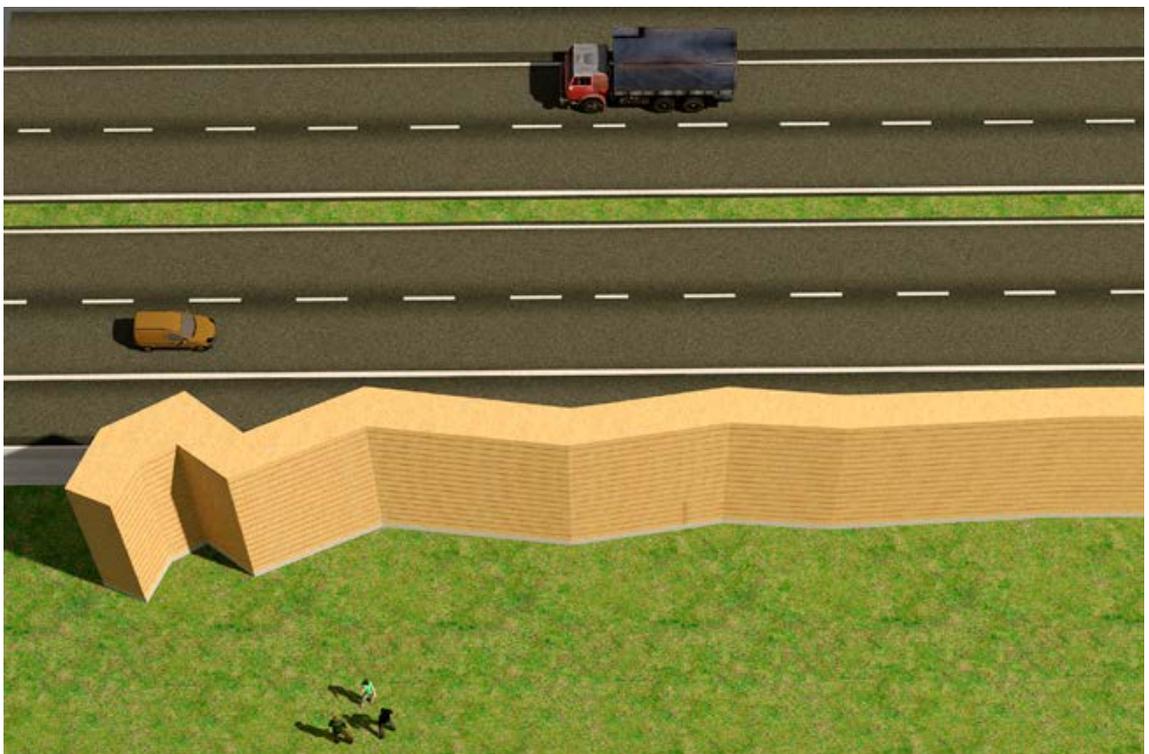


Abb. 43 Dreidimensionale schematische Darstellung der Formgebung am Ende einer Schwerlastwand aus Stampflehm. Diese Formgebung ist statisch, akustisch, ökologisch und ästhetisch wirksam. Grafik Sebastian Bertalan

9.2. Dedizierte Ausgestaltung der Lehmwand als Lebensraum

Siehe dazu auch die ökologische Bewertung „12.3. Lehmbauwand als Lebensraum für spezialisierte Arten im regionalen Biotopverbund“ auf Seite 90.

Die von uns vorgesehenen möglichen Elemente einer Lehm-Lärmschutzwand sind "Bienensteine", "Bienenlehm", Bohrungen, andere Einfügungen (z.B. Schilfrohr unter der Abdeckung), und Fleermausnischen.

Die folgenden integrierten Elemente für Insekten und andere Tierarten werden ausschließlich auf der Fahrbahn abgewandten Seite der Lehmwände angelegt, um keine unnötigen Kollisionsgefährdungen zu schaffen. Die Fahrbahnseite ist möglichst ‚tierfeindlich‘ angelegt. Ziel ist es, die Wand als in die Landschaft integrierte Naturschutzmaßnahme zu konzipieren, bzw. die räumliche Trennung von Baumaßnahme und ökologische Maßnahmen an anderer Stelle zumindest teilweise aufzuheben.

Konventionell

Im Zusammenhang mit dem traditionellen Einsatz von Lehm als Baustoff ist die partielle Besiedlung von Wellerlehmwänden mit Insekten ein bekanntes Phänomen, dazu sind keine gesonderten Vorkehrungen erforderlich. So kommt es vor, dass Insekten (z.B. Wildbienen) ältere Wellerlehmwände als Begleiterscheinung besiedeln.

Der Einsatz von Bauteilen aus Stampflehm in selbsttragenden ingenieurtechnischen Bauwerken erfordert eine Materialdichte, die derartige Entwicklungen nicht von vornherein zulässt. Es ist bisher nicht bekannt, dass beim Bau derartiger Konstruktionen gezielt Elemente vorgesehen bzw. eingebaut werden, die einen ökologischen Mehrwert im Sinne eines Angebots von Lebensraum für spezialisierte Arten vorsähe.

Neben konventionellen Lärmschutzwänden aus Metall oder Beton gibt es Bauweisen unter Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, die eine Besiedlung durch Tiere ermöglichen. Hinzu kommt die Möglichkeit der gezielten oder sukzessiven Besiedlung durch Pflanzen, die ihrerseits wiederum bestimmten Arten Lebensraum ermöglichen.

9.2.1. Innovationen im Hinblick auf die Ausgestaltung als Lebensraum

'Bienensteine'

Der Logik von Martin Rauchs "Erosionsbremsen" aus gebrannten Tonplatten folgend, hat Ute Reeh für den besonders besiedlungsfeindlichen Stampflehm vorgefertigte, bei niedriger Temperatur gebrannte Tonelemente mit Hohlräumen in verschiedenen Durchmessern für die Besiedlung durch Insekten, vorzugsweise Wildbienen vorgeschlagen. Diese Tonelemente sind am ehesten mit sogenannten „Insektenhotels“ vergleichbar. Diese in Schichten integrierten Elemente erfüllen gleichzeitig die Funktion eines Abwitterungsschutzes für die Lehmwand.

Für eine spätere Serienproduktion hat die Brandenburger Ziegelei Glindow Interesse signalisiert.



Abb. 44 Vom Team so genannte "Bienensteine" aus schwach gebranntem Ton im Stampflehmsegment der Testwand in Nebelin. Die Bienensteine im Bild sind von Kindern aus der Umgebung hergestellt worden. Foto Ute Reeh



Abb. 45 Detailansicht von durch Kinder gestaltete "Bienensteine" für nichtgrabende Wildbienen. Foto Ute Reeh

'Bienenlehm', bzw. unarmierter Lehm

Weitere vorgesehene Einbauelemente in Wellerlehm und in Stampflehm bestehen aus nicht-armiertem (Natur-)Lehm für "selbstgrabende" Insekten und ggf. auch Vogelarten, die ihre Niströhren selbst anlegen. Damit wird der Entwicklung begegnet, dass vergleichbare natürliche Lebensräume aus Lehm für spezialisierte Arten in der intensiv genutzten und regulierten Landschaft, z.B. durch Erosion an Fließgewässern immer wieder neu entstehende Steilufer, zunehmend selten geworden sind.

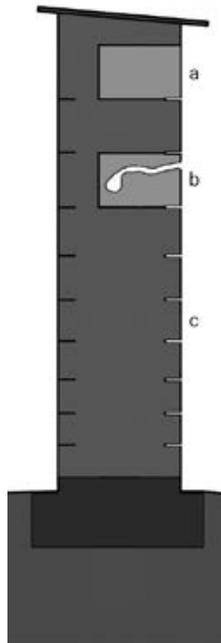


Abb. 46 Schematische Darstellung einer Stampflehm-Schwerlastwand in Schnittansicht. Auf der Autobahn-abgewandten Seite (rechts) mit integrierten Elementen aus unarmiertem Lehm (a, b) und mit integrierten ‚Bienensteinen‘ aus gebranntem Ton (c), die gleichzeitig auch vor Erosion durch herablaufendes Wasser schützen. Auf der Autobahnseite (links) sind übereinander Trasskalk-Einschlüsse als Erosionsbremsen vorgesehen. Grafik Sebastian Bertalan



Abb. 47 Das Foto zeigt einen Ausschnitt des Wellerlehmabschnitts der Testwand in Nebelin. Die schmalen, integrierten Elemente aus unarmiertem, nur schwach kompaktiertem Naturlehm sind gut zu erkennen. Zur Zeit der Aufnahme waren diese ‚Bienenlehm‘-Elemente noch nicht durchgetrocknet und die Wand noch nicht durch Abfräsen egalisiert. Foto Ute Reeh

Zu betonen ist in diesem Zusammenhang, dass diese Elemente aus unarmiertem und nur schwach verdichtetem Naturlehm statisch nicht relevant sind, weil sie lediglich im oberen Teil der Wand in Abständen zwischen die regulären Bauelemente in die Wand integriert sind. Selbst stärkere Oberflächenerosion dieser Elemente verursacht keine Änderung der statischen Verhältnisse.

Weitere Elemente, wie z.B. Schilfrohr

Zusätzlich zum spezifischen Angebot des Baustoffs Lehm lassen sich weitere Strukturen in eine Lehmwand integrieren, die auch anderen Tierarten Wohnraum bzw. Unterschlupf bieten. Entsprechend des Musters von Insektenhotels können partiell weitere Elemente in die Lehmwand integriert werden, z.B. unterhalb der Wandabdeckung Halme aus getrocknetem Stroh, Schilfrohr, Holzelemente etc.



Abb. 48 Videostill eines Materialversuchs von Christian Hansel. Unter der Abdeckung einer Wellerlehmwand angebrachte Schilfrohrstücke werden von bestimmten Wildbienen offenbar intensiv genutzt. Allein auf diesem Ausschnitt sind 9 Bienen zu erkennen: 6 im Flug und 3 in Löchern.

Fledermausnischen

Auf Vorschlag der Leitung des Biosphärenreservats haben wir uns auch dem Thema Fledermäuse gewidmet. Dieses ist direkt an der Autobahn eher nicht günstig. Wir schlagen auf Anraten der BAST einen Prototypenbau als Ummantelung/Schutz um die Raststätte herum vor. Diese schützt Landschaft und Natur und erfüllt die Voraussetzung der Reduktion des Flächenverbrauchs. Hier ist es laut Auskunft des Fledermausexperten Herrn Andreas Hagenguth sinnvoll, Nistmöglichkeiten zu schaffen. Ein solcher sehr trockener Nistplatz an der Wand (Wellerbauprototyp, 4 m hoch Ummantelung Raststätte) kommt für folgende im Gebiet lebende Arten in Frage und wären für ein Forschungsvorhaben (mit Monitoring durch die Biosphäre) interessant: **Zwergfledermaus, Breitflügelfledermaus, Mopsfledermaus, Graues Langohr, Braunes Langohr, Abendsegler**. Die Wand muss lediglich einfache unter dem Dach befindliche Nischen im Lehm mit schrägem Boden (damit Kot rausfallen kann) aufweisen. Diese würde mit einem vorgesetzten sägerauem Lärchenbrett so versehen, dass ein Spalt von je nach Art verschiedener Größe zwischen 1,5 und 3, evtl. 4 cm offen bleibt.

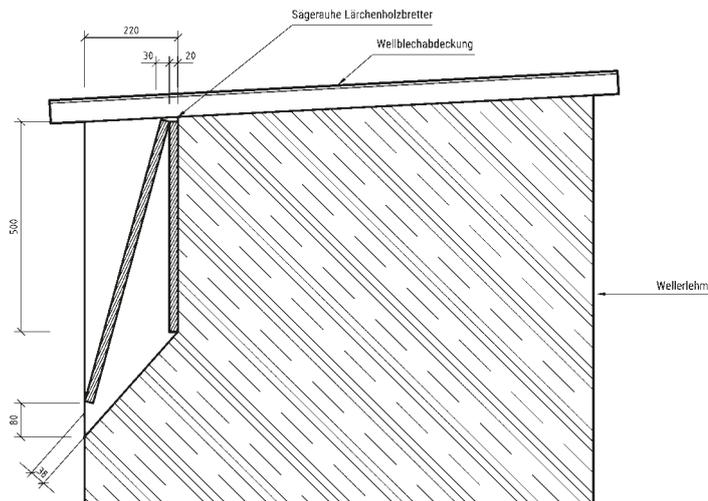


Abb. 49 Querschnittsdarstellung der vorgesehenen Fledermausnischen in einer Wellerlehm-Schwerlastwand. Zeichnung Sebastian Bertalan

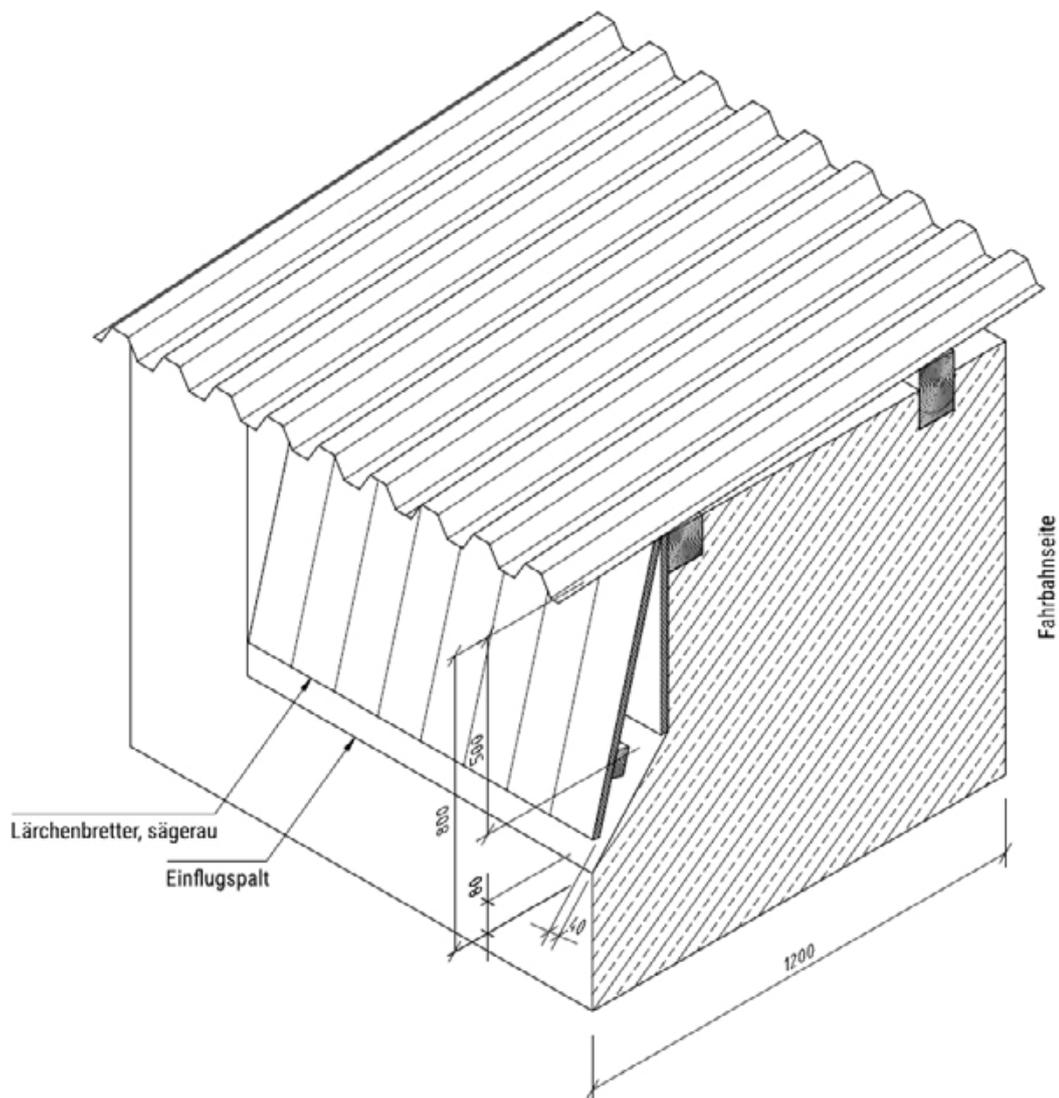


Abb. 50 Konstruktionsskizze Nisthilfe Fledermauskästen. Isometrische Schnittdarstellung; Detail des oberen Teils einer Wellerlehmwand. Zeichnung Sebastian Bertalan

10. Dauerhaftigkeit

Lehm wird durch Wasser verarbeitbar. Nach der Trocknung erlangt es seine Festigkeit. Dieser Prozess, eine komplette „Recyclierbarkeit“ kann als absolutes Alleinstellungsmerkmal im Bereich der mineralischen Baumaterialien gesehen werden.

Das bedeutet natürlich auch, dass Bauteile, die mit diesem Material hergestellt wurden, vor übermäßigem Wasseranfall geschützt werden müssen.

Unabhängig von den anzuwendenden Techniken sollte dies primär konstruktiv erfolgen. Im Fall von Regen und Schnee werden in der Regel den lokalen Wetterverhältnissen angepasste Dachüberstände eingerichtet.

Um vor aufsteigender Feuchtigkeit aus dem Baugrund sowie vor Spritzwasser zu schützen, ist immer eine mindestens 30 cm hohe, gegen kapillaren Aufstieg geschützte Sockelzone vorzusehen. Das Eindringen von Niederschlagswasser in die Krone wird durch eine geeignete Abdeckung verhindert.

Durch Witterungseinflüsse wird sich an den senkrechten Flächen eine gewisse Erosion einstellen (Erfahrungswert 3-5 cm in 100 Jahren), der wie es auch bei anderen Baustoffen üblich und erforderlich ist, durch ausreichende Dimensionierung begegnet wird. Gegebenenfalls kann ihr auch durch Wartung entgegengewirkt werden.

Art, Auswirkungen und Geschwindigkeit einer Erosion von Lehmoberflächen ist neben den Einwirkungsfaktoren auch vom Material selbst abhängig. Hier spielen eine Rolle:

- der Tongehalt
- die Korngrößenverteilung
- organische Inhaltsstoffe
- Herstellungsverfahren
- Dichte bzw. Porosität
- Textur der Oberfläche

In allen Regionen der Welt kann man daher auch sehr unterschiedliche Lösungsansätze finden, die jedoch immer auf einer genauen Beobachtung und Prüfung der lokalen Verhältnisse basieren.

Wichtig ist hier zudem die Unterscheidung zweier Phänomene, die zu zum Teil unterschiedlichen, sich zu widersprechen scheinenden Lösungsansätzen geführt haben. Zur Erläuterung:

Ansatz 1

Entwickeln von möglichst glatten, sehr geschlossenen, homogenen Oberflächen, die eine möglichst schnelle Wasserableitung ermöglichen, sodass der Feuchte kaum Zeit verbleibt, tiefer in das Gefüge einzudringen um es aufzuweichen.

Ansatz 2

Entwickeln von zum Teil stark texturierten Oberflächen, die die Geschwindigkeit der Wasserableitung verlangsamen und so die Gefahr eines erhöhten Materialabtrages mindern und starke Erosionsspuren verhindern.

Beide Ansätze haben ihre Berechtigung, zum Teil auch in ein und derselben Region. Die Auswahl der ein oder anderen Vorgehensweise kann nach Prüfung der weiteren, oben genannten Aspekte durchaus aus gestalterischen Gründen geschehen.

10.1. Beispiele für Erosion an historischen Wellerlehm-Gebäuden in Ostdeutschland

Allgemein kann man sagen, dass bei historischen Gebäuden in Ostdeutschland der Oberflächen-substanzverlust überall ca. 3-5 cm auf über 100 Jahre beträgt. Die Gebäude in den folgenden Beispielen sind 120 bis 130 Jahre alt.



Abb. 51 Rackwitz (Sachsen), Leipziger Str.1; Alter ca. 130 Jahre, Dicke: 80 cm, Straßenabstand : 2-3 m, Höhe mit Sockel: 4,50 m, Substanzverlust: ca. 5 cm. Foto Christian Hansel



Abb. 52 Mocherwitz (Sachsen), Lindenstr.; Straßenabstand: 20 m , Höhe: 4,0 m. Foto Christian Hansel

Weitere Beispiele aus Sachsen sind zwei Häuser in Brinnis (Lindenhayner Str., Höhe 3,50m, Straßenabstand 2,00 m; Lindenhayner Str., Straßenabstand ca. 5,0 m).

10.2. Projektierte Maßnahmen zur Erosionskontrolle

Eine erodierende Fassade macht Angst in erster Linie aus Unwissenheit und mangelndem Vertrauen in sich verändernde, vergängliche Lehmkonstruktionen. Es ist wichtig mit diesen Eigenschaften eine materialgerechte Architektursprache zu entwickeln, denn dann wird es möglich, Lehmkonstruktionen in größerem Volumen umzusetzen.

10.2.1. Schutzeinrichtungen, Zwischenbereich, Sammelrinne und Abfluss

Das projektierte Entwässerungssystem eignet sich für alle von uns vorgesehenen Bauvarianten. Ein wichtiges und (buchstäblich) grundlegendes System zur Erosionskontrolle besteht aus folgenden Einzelkomponenten (siehe dazu Abb. 53):

1. **Betonsockel**
Sowohl im Fall der Schwerlastwand (in beiden Varianten, Stampf- und Wellerlehm), als auch im Fall der Trägerwand bildet ein 30 cm hoher Sockel aus armiertem Beton den 'Fuß' der Wand und schützt – neben seiner stabilisierenden Funktion – vor aufsteigender Feuchtigkeit und Spritzwasser.
2. **Betonschutzwand in einseitigem 'Jersey'-Profil**
Am Rand der Fahrbahn/Standspur sind Betonschutzwände angebracht, welche die Wand sowohl mechanisch vor Aufprall von Fahrzeugen, als auch vor direktem Spritzwasser und bodennahem Sprühnebel bei Nässe schützen. In bestimmten Abständen sind in dieser Schutzwand Wasserdurchlässe vorgesehen, durch die das Wasser von der Fahrbahn nach außen in die Sammelrinne ablaufen kann. Die Durchlässe müssen eine Höhe von mehreren Zentimetern haben, um nicht zu verstopfen.
3. **Abfluss unter der Wand hindurch**
Das Wasser läuft durch eine durchlässige Steinschüttung zwischen den Bohrfundamenten und unterhalb des Wandsockels über die Böschung ab (siehe Abb. 53, unten).

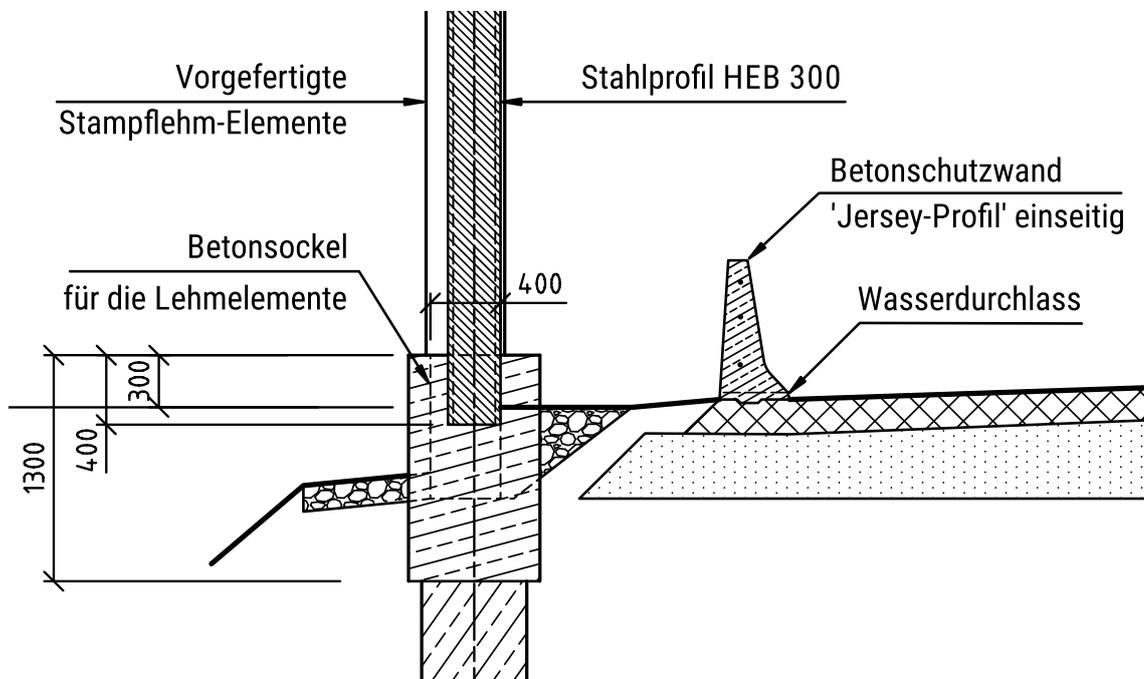


Abb. 53 Schnittdarstellung eines möglichen Entwässerungssystems; hier im Fall der Variante Trägerwand.
Zeichnung Sebastian Bertalan

10.2.2. Ergänzung der statisch erforderlichen Wandstärke

Die statisch erforderliche Wandstärke der Konstruktion wird zur Bauzeit um ein Maß der vorgesehenen Abwitterungsschicht von beidseitig 2,5 cm ergänzt. Diese Maßnahme betrifft sowohl Wel-

ler- als auch Stampflehm. Die erfahrungsgemäße Abwitterung nimmt im Lauf der Zeit progressiv ab, da die jeweilige Armierung – bei Stampflehm die Kieskomponente und die Erosionsbremsen, bei Wellerlehm schindelförmig nach unten gebogenes Stroh – das Auswaschen des Lehms zunehmend verhindert. Für den statischen Nachweis der Wandkonstruktionen (vgl. Kapitel „5. Konstruktion“ auf Seite 25) wird die o.g. Abwitterungsschicht derzeit angenommen. Das Maß der Abwitterungsschicht ist im Zuge der gutachterlichen Stellungnahme, als Grundlage der erforderlichen Zustimmung im Einzelfall (ZiE) vorzugeben. Als Grundlage hierzu dienen Erfahrungswerte aus vergleichbaren Mileausituationen (z.B. Feuchtigkeit, Salzgehalt...) bzw. praktische Versuche hierzu.

10.2.3. Bepflanzung mit Efeu auf der Fahrbahnseite

An der Autobahnseite lassen sich Lehmwände mit Efeu bepflanzen. Lehmwände sind so trocken, dass die Wurzeln des Efeu nicht in die Wände eindringen. Der Bewuchs erhöht die Lärmschutzwirkung und stellt einen sehr guten zusätzlichen Erosionsschutz dar.

10.2.4. Oberfläche und kontrollierte Erosion durch Erosionsbremsen – Stampflehm

Wegen ihrer Wasserlöslichkeit muss eine Wand aus Stampflehm in der Fläche vor Erosion geschützt werden. Erosion entsteht immer dann, wenn Wasser abfließt. Fließt das Regenwasser in der Fassade zu schnell ab, reißt es Material mit, läuft es hingegen langsamer ab, bleibt entsprechend mehr Lehm zurück. Deshalb werden in einer Stampflehmmauer Erosionsbremsen eingebaut, um die Fließgeschwindigkeit des Wassers entlang der Mauer zu verlangsamen. Diese horizontalen Schichten können aus vorstehenden Steinen oder gebrannten Ziegeln bestehen, alternativ auch als bündig in die Wand integrierte Lagen aus Trasskalkmörtel. Bei allen Konstruktionen ist die Wirkung dieselbe: Der Wasserfluss wird gebremst und damit auch die Erosion.

Dem Material selbst wohnt eine natürliche Erosionsbremse inne: Nach den ersten Jahren ist die oberste, feine Lehmschicht ausgewaschen, die Steine kommen zum Vorschein und die Mauer erscheint rauer. Dadurch bewahrt sich die Wand selbst davor abgetragen zu werden, denn die freigelegten Kiesel stabilisieren die Wand. Die zwischen den Steinen verbleibenden Lehmfugen liegen jetzt tiefer in der Wand und quellen bei Regen auf. Dieses Quellen des Lehms verhindert, dass Wasser tiefer in die Wand eindringt. Dadurch kommt die Erosion zunehmend zum Ruhen. Da dieser Prozess vorauszusehen ist und die Bremsen ihn steuern, ist von einer kalkulierbaren beziehungsweise von einer kalkulierten Erosion die Rede. Sie muss technisch und gestalterisch in die Planung einfließen. Und sie führt dazu, dass eine Stampflehmwand Jahre benötigt, bis sie sich in ihrer fertigen Oberfläche präsentiert. Dabei wird die Wetterseite durch den Schlagregen stärker ausgewaschen als die wetterabgewandten Seiten.

Eine Stampflehmwand ändert sich in ihrem Ausdruck über die Jahre, die Oberfläche wird rauer. Links die Darstellung einer Wand nach der Fertigstellung, rechts die gleiche Wand mit Steinen, die hervortreten, nachdem die feine Lehmschicht abgetragen ist.

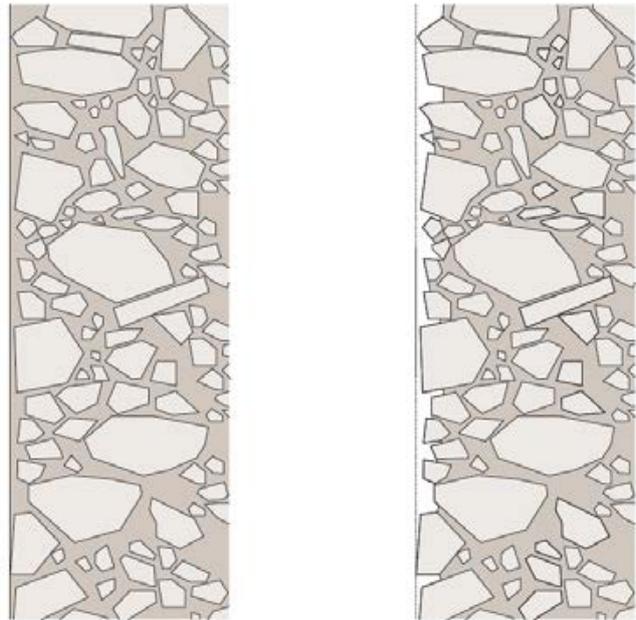


Abb. 54 Darstellung der Abwitterung einer Stampflehmwandoberfläche. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch

Mehrere Arten von horizontalen Streifen prägen eine Wand aus Stampflehm.

Einerseits sind es die Spuren der handwerklichen Fertigung, die sich in einzelnen Schichten von rund 10 cm Stärke äußern. Diese Zeichnung ist sehr subtil: Das lockere Material wird in die Schalung gefüllt und mit Druckluftstampfern, Rüttelplatten oder Walzen aus dem Tiefbau auf etwa die Hälfte der ursprünglichen Höhe verdichtet. Dabei wird der obere Teil der Schicht stärker komprimiert als der untere, was dazu führt, dass die Schichten am unteren Ende der Lage poröser erscheinen, oben jedoch der kompaktere Lehm eine homogene und geschlossene Oberfläche aufweist. Dies ist der Grundrhythmus einer Stampflehmwand, in dem sich die unterschiedlich dichten Lagen abwechseln. Es sind Struktur – und gleichzeitig Ornament –, die aus der Arbeit entstehen und den ursprünglichsten Ausdruck einer Lehmwand darstellen. Die sinnliche Erscheinung des Stampflehms hängt stark mit diesem Effekt zusammen.

Einen anderen Takt weisen die Erosionsbremsen auf, die den Fluss des Wassers entlang der Mauer verlangsamen. Sie sind in der Höhe gestaffelt alle 40 bis 60 cm angeordnet. Wenn sie aus Ziegelleisten mit gebrannten Steinen bestehen, ragen diese aus der Ebene heraus und der Schatten verstärkt ihre Präsenz. Entsprechend prägen sie die Erscheinung der Wand und gliedern sie in einzelne horizontale Streifen. Bei den eingelegten Erosionsbremsen sind die Gestaltungsmöglichkeiten vielfältig: Sie können aus Steinen bestehen, aus präzise geformten Ziegeln oder aus gespaltenem Material. Alternativ lassen sich die Ziegel komplett von Hand formen wie beim Wohnhaus Rauch in Schlins (siehe Fotos Abb. 57 und Abb. 58). Dadurch entsteht eine weiche Linie, die sich mit der bewegten Oberfläche der Wand verbindet.

Erosionsbremse aus vorstehender
Keramikleiste. Eine Finlage kompensiert
den Überstand. Schnitt durch
die Schalung im Maßstab 1:10

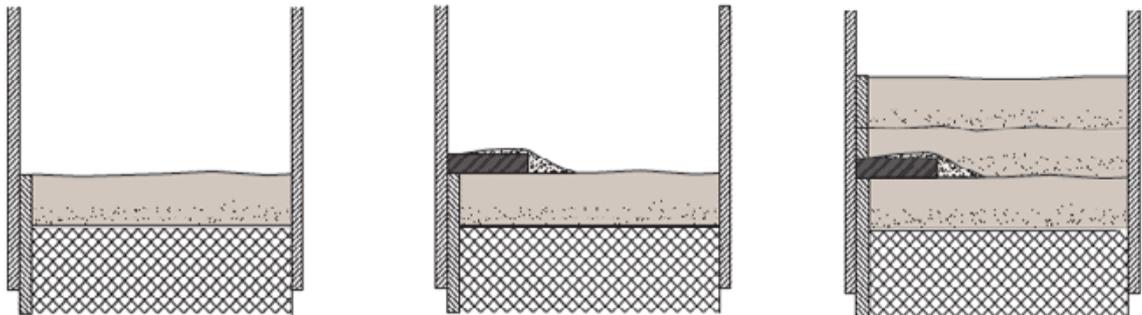


Abb. 55 Schnittdarstellung der Integration einer Erosionsbremse in Stampflehm während des schichtweisen Aufbaus in der Verschalung. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch

Weit diskreter treten Erosionsbremsen aus Trasskalkmörtel in Erscheinung, die bündig in die Wand eingearbeitet sind. Dabei wird alle vier bis sechs Lagen eine keilförmige Leiste an der Außenseite mit eingestampft. Der Trasskalk ist zumeist grauer als der Lehm und ist als feine Linie sichtbar, die nach dem Ausschalen zunächst bündig mit der Wand ist. Wenn die äußerste Lehm-schicht vom Regen ausgewaschen ist, treten diese Leisten ein wenig stärker hervor. Direkt darunter bleibt das Material erhalten, über der Bremse hingegen wird der feine Lehm abgetragen. Eine Wand mit Erosionsbremsen aus Trasskalk verändert sich auf eine andere Weise als eine Wand mit vorstehenden Leisten.

Für die der Autobahn zugewandten Seite passt zu im Werk vorgefertigten Elementen eine Erosionsbremse aus eingestampftem Trasskalk wesentlich besser, da sich mit ihr sowohl die Produktionsweise als auch der Transport vereinfachen.

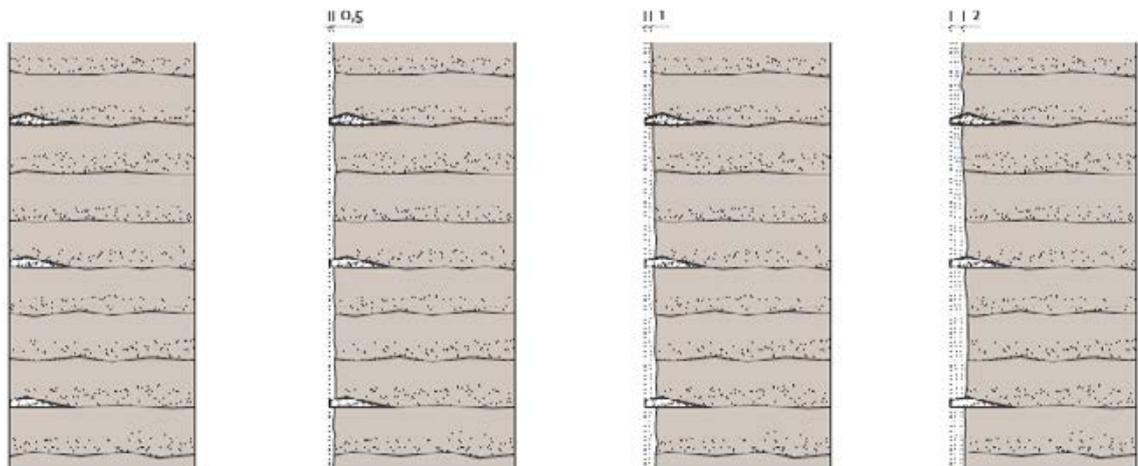


Abb. 56 Um die Erosion zu kontrollieren, werden Hindernisse für das herunterlaufende Regenwasser eingebaut. 'Erosionsbremsen' aus eingestampftem Trasskalk mit fortschreitender Erosion (Schnittdarstellung). Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch

Vorstehende Erosionsbremsen bieten ein großes gestalterisches und funktionales Potenzial: Die Leisten ragen rund 2 cm vor, was die entsprechend starke Einlage in der Schalung kompensiert. Die Mauer wird zunächst bis zur Unterkante der Erosionsbremse gestampft. Darauf kommt eine Ziegel- oder Steinlage zu liegen. Eine Schicht aus Lehmörtel deckt sie zu, um die Dauerhaftigkeit der Verbindung zu gewährleisten und den Druck zu verteilen, der beim Stampfen der weiteren Wand entsteht. Danach wird die Schalung wieder aufgedoppelt und die nächste Lage aus Lehm gestampft. Zwischen den Einlagen bleibt Platz für die Erosionsbremsen, die eigentliche Stampflehmwand bleibt um die Stärke der Einlage zurück. Diese Technik ist mit einem simplen und leicht erhöhten Schalungsaufwand verbunden, der eher der handwerklichen Produktion vor Ort

entspricht. Die Wahl der Erosionsbremse definiert den Charakter einer Wand. Nicht nur in ihrem anfänglichen Ausdruck, auch nach Jahren prägt die Technik der Leiste ihre Erscheinung. Beide Ansätze lassen sich prinzipiell sowohl in vorgefertigten als auch vor Ort gefertigten Wänden umsetzen – mit der Einschränkung, dass hervorstehende Ziegelleisten bei vorgefertigten Elementen eine besondere Herausforderung darstellen. (Martin Rauch, 2015, S. 70 - 73)



Abb. 57 Die dem Wetter exponierte Fassade des Haus Rauch kurz nach Fertigstellung 2008. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch



Abb. 58 Fassade des Haus Rauch 2010 nach zwei Jahren Erosion. Mit freundlicher Genehmigung von Martin Rauch

10.2.5. Oberfläche und kontrollierte Erosion – Wellerlehm

Durch das Abstechen/Abfräsen/Absägen der Oberfläche beim Wellerlehm wirken die während des Baus abgestochenen Strohhalme als Erosionsbremsen. Es gibt etliche über 100 Jahre alte unverputzte Scheunen, deren dem Wetter ausgesetzte Giebelseiten nur minimal abgewittert sind (siehe „10.1. Beispiele für Erosion an historischen Wellerlehm-Gebäuden in Ostdeutschland“ auf Seite 63).

Im Gegensatz zum Stampflehmverfahren weist der Wellerlehm allein schon durch die Zugabe von Stroh eine höhere Porosität sowie ein geringeres Volumengewicht auf. Je nach Verdichtung im Herstellungsprozess erreichen wir hier ca. 1500 kg/m^3 – 1800 kg/m^3 . Das bedeutet, dass hier eine etwas größere Angriffsfläche durch Kapillarität für eindringendes Wasser gegeben ist. Das spezielle Herstellungsverfahren, insbesondere das „Abstechen“ der Oberflächen am Ende des Prozesses führt dazu, dass die Struktur der Lehm Masse mit ihren Strohanteilen nun gerichtet wird, mit einer leichten Neigung nach unten. Dies bewirkt unter anderem eine erhöhte Resistenz in Bezug auf Materialabtrag.

Es entsteht an Welleroberflächen ein kurzfristiger Abtrag von ca. 5 mm. Das Stroh an der Oberfläche tritt etwas hervor. Danach stellt sich ein gewisses Gleichgewicht ein. Die Erosion schreitet nur sehr langsam voran. An historischen Wellergebäuden sind Materialabträge von 3-5 cm innerhalb von 100 Jahren feststellbar.

Bei Wohnhäusern wurden zusätzliche Kalkputze verwendet. Hingegen kann festgestellt werden, dass dies bei einfachen, landwirtschaftlich genutzten Gebäuden nicht immer der Fall war und diese trotzdem über lange Zeiträume hinweg und ohne wesentlichen Unterhalt nur geringe Erosion aufweisen: Erfahrungswerten zufolge 3-5 cm 100 Jahren.



Abb. 59 Geschalte Wellerlehmoberfläche nach einem Jahr. Die Wandstärkenzugabe im Vergleich zum Sockel berücksichtigt die vorhersehbare Abwitterung. Foto Christian Hansel



Abb. 60 Abgestochene Wellerlehmoberfläche auf der Wetterseite nach zwei Jahren. Foto Christian Hansel

10.2.6. Wirkung von Spritzwasser, Tausalz und Schneeräumung

Ein direkter Schutz für die Lehm-Lärmschutzwand vor der Einwirkung von Spritzwasser aus dem Verkehr und gegen aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Unterbau bzw. Untergrund ist durch den vorgesehenen Sockel und die als passive Schutteinrichtung vorgeschlagene Betonschutzwand (beides siehe Abb. 53 auf Seite 64) gegeben. Hierdurch wird auch weitgehend verhindert, dass Schnee aus der Räumung der Straße beim Winterdienst, der außer Wasser auch Tausalze enthalten kann, in Kontakt mit der Wand kommen kann.

Schneereste, die ggf. bei großen Schneemengen durch den Winterdienst über die Betonschutzwand gelangen, entwässern beim Auftauen in den Boden bzw. in das Entwässerungssystem (siehe ebenfalls Abb. 53), so dass kein Wasser in die eigentliche Lärmschutzwand aufsteigen kann. Abb. 61 weiter unten zeigt eine solche Situation mit Schneeresten unterhalb des Sockels der LSW-Elemente.

Durchgetrocknete Lehmwände weisen mit im Schnitt nur ca. 6-7% Feuchtigkeit generell niedrige Wassergehalte auf. Daher ist die ungesättigte Leitfähigkeit sehr niedrig, und sie sind zu Beginn von Niederschlägen wasserabweisend. Dies bewirkt, dass Feuchtigkeit aus Niederschlägen oder Sprühnebel nur oberflächlich eindringt. Dadurch können zwar durch salzhaltige Sprühnebel an der Lehmoberfläche kleine Mengen Tausalze abgelagert werden, so dass im Winter die Feuchtigkeit dort länger gehalten wird. Durch Sommerniederschläge werden sie jedoch wieder abgewaschen. Die Salzverwitterung in natürlichen Gesteinen kann in mitteleuropäischen Klimaregionen nur an niederschlagsgeschützten Bereichen auftreten. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass dies die Stabilität oder die Erosion beeinflusst.

Dies zeigt sich auch an empirischen Befunden an gebauten Beispielen. Daher können die Auswirkungen von Schlagregen und salzhaltigem Sprühnebel auf den Lehm als gering oder zu vernachlässigen eingestuft werden. Dies belegen existierende Lehmwände nahe oder direkt an

Straßen. Lehmbauwerke, die an Straßen stehen, zeigen dieselbe erkennbare Erosion wie Lehm-
bauten, die nicht an der Straße stehen (siehe z.B. Abbildungen in Kap. 10.1).

Im Rahmen einer Zulassung im Einzelfall würde dennoch geprüft, ob Salz (von Spritzwasserres-
ten bzw. Salzsprühnebel) in die Wand eindringt, und ob dies unter Freilandbedingungen zu redu-
zierter Stabilität der Wand führen kann.



Abb. 61 Lärmschutzwand mit vorgelagerter Schutzeinrichtung (Betonschutzwand) bei beengten Platzverhältnissen
an der BAB A1; im Zwischenraum Schneereste vom Winterdienst. Foto BAST

Teil II: Lärmschutzfunktion

Schallschutzwirkung – Schallabsorptionsgrad – DIN-Prüfungen – Messreihen – Hallraum – Wellerlehm – Stampflehm – akustische Prüfung – Adrienne Test – Verfugung – Erosion

Die Lärmschutzigenschaften der Baustoffe Stampf- und Wellerlehm sind für das vorgelegte Bauvorhaben von elementarer Bedeutung. In diesem Zuge haben Expert*innen der TH Lübeck, gemeinsam mit dem Institut für Akustik an der TH Lübeck – VPMA Prüfstelle nach DIN 4109, einen Versuchsaufbau gemäß DIN EN 1753 Teil 01 realisiert (Abschnitt 11.1). Die Bundesanstalt für Straßenbau Bundesanstalt unterstützt die Studie wissenschaftlich und übernimmt weitere Messungen. Dies betrifft, sobald die Pandemie dies zulässt, sowohl DIN CEN/TS 1753 Teil 05 (Adrienne-Test) als auch Impedanzrohrmessungen von Weller- und Stampflehmwänden in glattem und vorerodiertem Zustand ergänzt (Abschnitt 11.1.2).

Nach Auswertung der Messungen haben wir die Technologie umgestellt, um durch stark zerklüftete Oberflächen die Absorption zu erhöhen. Messungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) haben in Kombination mit Wellerlehm und Stampflehm die Auswirkungen bestimmter Materialien, bzw. verschiedener Elemente mit Luftkammern auf das Absorptionsverhalten untersucht (Abschnitt 11.3).

11. Lärmschutz und Nachweise

Für eine Marktzulassung müssen Lärmschutzwände nach DIN EN 14388 zertifiziert werden. Das bedeutet, dass dies keine „pauschale“ Genehmigung ist, sondern eine auf einen genau spezifizierten Typus ausgerichtete Zulassung. Hierzu ist es erforderlich, dass sämtliche Parameter eindeutig beschrieben sind, unter anderem der spezifische Anwendungsfall, der genaue Ort, die Geometrie (Detaillierung), einzusetzende Materialien.

Sodann sind gefordert:

Nichtakustische Prüfungen nach:

- DIN EN 1794-1 „Mechanische Eigenschaften und Anforderungen an die Standsicherheit“,
- DIN EN 1794-2 „Allgemeine Sicherheits- und Umweltaanforderungen“ und
- DIN EN 1794-3 „Brandverhalten“.

In den Normen DIN EN 14389 Teil 1 und Teil 2 werden dann die Verfahren zur Bewertung der Langzeitwirksamkeit akustischer und nichtakustischer Eigenschaften beschrieben.

11.1. Akustische Prüfungen an der TU Lübeck

Hierzu sind neben den weiteren Anforderungen von dem zur Zulassung beantragten Element verschiedene akustische Prüfungen durchzuführen, die im Normenwerk der Reihe DIN EN 1793 erläutert sind. Wichtig ist im Fall der vorliegenden Arbeit, einen kleinen Hintergrund zur aktuellen Normungssituation zu geben:

Zu Beginn der Normungsarbeiten zu den Anforderungen von Lärmschutzwänden wurden zunächst nur die aus der Bauakustik stammenden Prüfverfahren zur Schallabsorption (DIN EN 1793 Teil 1-Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption in diffusen Schallfeldern) und zur Luftschalldämmung (DIN EN 1793 Teil 2) herangezogen. Die Messungen erfolgen hierbei in geschlossenen Laborprüfräumen mit (Mehrfach-Reflexionen).

Im Zuge der weiteren Bearbeitung der Regelwerke der Reihe DIN EN 1793 wurde es als sinnvoll erachtet, diese Prüfungen zu ergänzen bzw. auch zu ersetzen, um Aussagen über die Eigenschaften im Freien, also im Regelfall zu erhalten. Daraus sind die Normen DIN EN 1793-Teil 5 (Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern) und DIN EN 1793 Teil 6 (Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Luftschalldämmung in gerichteten Schallfeldern) entwickelt worden.

Um im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie, die KEIN Marktzulassungsverfahren beinhaltet, trotzdem eine erste Einordnung der Eigenschaften von Lehmoberflächen zu erhalten, wurden an der TH Lübeck gemeinsam mit dem Institut für Akustik an der TH Lübeck – VMPA Prüfstelle nach DIN 4109 Testreihen gemäß den Vorgaben der DIN 1793 Teil 1 durchgeführt. Diese Messungen werden folgend beschrieben.

11.1.1. Akustische Messungen

Der Versuchsaufbau gemäß DIN EN 1753 Teil 01 erfordert den Einbau einer Fläche von mindestens 10 m² des zu prüfenden Materials in einem Hallraum (Definition siehe Norm). Die Höhe dieser Fläche sollte materialabhängig, jedoch mindestens 5 cm betragen. Ansonsten ist sie für die nachfolgenden Messungen nicht relevant.

Die Messung des Schallabsorptionsgrades wird gemäß der in DIN EN 1793-1 beschriebenen Anordnung und dem in DIN ISO EN 354 (Messung der Schallabsorption in Hallräumen) beschriebenen Verfahren durchgeführt. Es sind 36 Messungen an unterschiedlichen, repräsentativen Stellen des Hallraums (nach durchzuführen. Dabei sind die Werte aus dem in DIN ISO 266 beschriebenen Frequenzband (100HZ-5.000HZ) maßgeblich.

Die letztendlichen Berechnungen des für spätere Zwecke zu Grunde zu legenden Mittelwerts berücksichtigt neben den bereits erwähnten sowie in den jeweiligen Norm-Teilen beschriebenen Randbedingungen auch die Luftfeuchtigkeit des Prüf- bzw. Hallraumes. Diese wird während der Prüfung, sowie anschließend bei dem geleerten, geräumten Raum vorgenommen. Je nach Luftfeuchte können vor allem hohe Frequenzen sehr unterschiedlich transportiert werden, und somit das Gesamtberechnungen maßgeblich beeinflussen.

Bewertung nach ISO 11654

- Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w
- Schallabsorberklasse

(Bewertung nach ASTM C 432-08)

- SAA (Sound Absorption Average)
- NRC (Noise Reduction Coefficient)

Bewertung nach DIN EN 1793-1

- Einzahlangabe der Schallabsorption: $DL\alpha$ (dB)
- Absorptionsgruppe

Es folgt eine Beschreibung der verschiedenen Messungen und Ergebnisse.

11.1.1.1. Messungen und Ergebnisse Wellerlehm

In diesem Fall wurde eine Analogie zu einer sich im Außenbereich befindenden Oberfläche dadurch geschaffen, dass im Vorfeld Wellerlehmblöcke in Brandenburg vorgefertigt wurden, diese dann in transportfähigem Zustand zur Materialprüfanstalt Schleswig Holstein gebracht wurden. Nach einer weiteren Trocknungszeit wurden die Blöcke mit den Abmessungen 120 cm, 50 cm, 50 cm händisch in ca. 10 cm dicke Platten zersägt.

Diese Platten wurden mit einem entsprechenden Fugenbild gemäß Vorgaben der DIN EN 1753 Teil 1 in den Schallraum eingebracht.

Messreihe 01: Wellerlehmplatten, mit Fugenbild

Die Messreihe mit 36 Einzelmessungen wurde durchgeführt, folgend die Ergebnisse:

Bewertung nach ISO 11654

- Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w : 0,35
- Schallabsorberklasse D

Bewertung nach ASTM C 432-08

- SAA (Sound Absorption Average) 0,33
- NRC (Noise Reduction Coefficient) 0,35

Bewertung nach DIN EN 1793-1

- Einzahlangabe der Schallabsorption: $DL\alpha$ 2 dB
- **Absorptionsgruppe: A1**

(Siehe Datenblatt im Anhang, Seite 189)

Messreihe 02: Wellerlehmplatten mit geschlossenem Fugenbild

Um den Einfluss des groben Fugenbildes zu bewerten, wurde eine erneute Versuchsanordnung gemessen, bei der zuvor die Fugen mit einer aus demselben Material bestehenden Wellerlehm gefüllt wurden. Die Oberfläche wurde zudem dem Material entsprechend geglättet. Es ergaben sich nach weiteren 36 Einzelmessungen folgende Werte:

Bewertung nach ISO 11654

- Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w : 0,15
- Schallabsorberklasse E (H)

Bewertung nach ASTM C 432-08

- SAA (Sound Absorption Average) 0,14
- NRC (Noise Reduction Coefficient) 0,15

Bewertung nach DIN EN 1793-1

- Einzahlangabe der Schallabsorption: $DL\alpha$ 1 dB
- **Absorptionsgruppe: A1**

(Siehe Datenblatt im Anhang, Seite 190)

11.1.1.2. Messungen und Ergebnisse Stampflehm

Ausgangsmaterial für die nachfolgenden Messungen war eine Stampflehmmischung der Firma Conluto, die in Big-Bags verarbeitungsfertig geliefert wurden. Mittels Gabelstapler, Hubwagen, Schubkarren und Schaufeln wurde 1 m³ dieser Mischung (ca. 1.600 kg) in den Hallraum eingebracht. Auf der Fläche von 10,50 m² ergab sich eine Schichthöhe von 5 cm. Neben einem Vergleich mit den Eigenschaften der Wellerlehmoberflächen ging es hier auch darum, den Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes zu bewerten.

Messreihe 03: Stampflehm, erdfeucht, kurz nach Einbringung

Die erzeugte Stampflehmfläche wurde unmittelbar nach Einbringung gemessen. Es ergaben sich folgende Werte:

Bewertung nach ISO 11654

- Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w : 0,25
- Schallabsorberklasse E (H)

Bewertung nach ASTM C 432-08

- SAA (Sound Absorption Average) 0,24
- NRC (Noise Reduction Coefficient) 0,25

Bewertung nach DIN EN 1793-1

- Einzahlangabe der Schallabsorption: $DL\alpha$ 1 dB
- **Absorptionsgruppe: A1**

(Siehe Datenblatt im Anhang, Seite 191)

Messreihe 04: Stampflehm, Trocknung vor Ort, nach 8 Tagen

Die erzeugte Stampflehmfläche wurde nach der Trocknung gemessen. Es ergaben sich folgende Werte:

Bewertung nach ISO 11654

- Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w : 0,30
- Schallabsorberklasse D (H)

Bewertung nach ASTM C 432-08

- SAA (Sound Absorption Average) 0,26
- NRC (Noise Reduction Coefficient) 0,25

Bewertung nach DIN EN 1793-1

- Einzahlangabe der Schallabsorption: $DL\alpha$ 2 dB
- **Absorptionsgruppe: A1**

(Siehe Datenblatt im Anhang, Seite 192)

Dokumentation der Testreihen



Abb. 62 Testreihe 1: Manuelles Trennen eines Wellerlehmblocks aus der Prignitz. Foto Heiner Lippe



Abb. 63 Testreihe 1, Versuchsaufbau: die Unebenheiten, die Texturen sind gut zu erkennen. Foto Heiner Lippe



Abb. 64 Testreihe 2: Verfüllen der Oberflächenfugen auf der Testfläche aus vorheriger Testreihe 01. Foto Heiner Lippe



Abb. 65 Testreihe 2: Oberfläche der Testfläche nach Begradigung und Verfüllung. Foto Heiner Lippe



Abb. 66 Testreihe 3: Detail des Ausgangsmaterials. Foto Heiner Lippe



Abb. 67 Testreihe 3: Detailbild der Oberfläche des manuell gestampften Materials. Foto Heiner Lippe



Abb. 68 Testreihe 4: Detailbild vor Entfernen aus dem Hallraum. Foto Heiner Lippe



Abb. 69 Testreihe 4: partielle Austrocknung, Versuchsaufbau vor den Messungen. Foto Heiner Lippe

11.1.2. Zusammenfassung und Bewertung

11.1.2.1. Plausibilität der Prüfungen und Ergebnisse

Entgegen den ursprünglichen Vermutungen wiesen die Oberflächen des Stampflehms eine etwas höhere Schall-Absorptionsfähigkeit auf, die im Verlauf der Trocknung sogar leicht anstieg.

Die Messungen der geglätteten, jedoch einem stärker erodierten Zustand entsprechenden Wellerlehmoberflächen ergaben eine geringere Schallabsorption. Nur im Fall der ausgeprägten, ‚zerklüfteten‘ Oberfläche (Fugenbild) waren die Werte erwartungsgemäß besser.

Die vorgenommenen Messungen ermöglichen nun eine erste Einordnung über die schallabsorbierenden Eigenschaften der gewählten Lehmoberflächen. Das Verfahren der Messungen im Hallraum gemäß DIN EN 1753 Teil 01 ist dazu geeignet. Bis zur Erstellung der weiteren Normteile (DIN EN 1753 Teil 05 und DIN EN 1753 Teil 06) war es sogar das geforderte Verfahren.

Alle 4 getesteten Wandaufbauten sind damit zunächst der Absorptionsgruppe A1 (nicht absorbierend) zuzuordnen. Gemäß ZTV-Lsw 06, Kapitel 2.2, Tabelle 1 (siehe unten, Tabelle 6). Hier wird ausgeführt:

„Wird in der Leistungsbeschreibung nicht ausdrücklich einer der absorbierenden Gruppen A3, A3 oder A4 gefordert, sind Lärmschutzwände nicht absorbierend auszuführen.“

| Gruppe nach | Absorption DL_a | |
|-------------|-------------------|--------------------|
| A1 | <4 | nicht absorbierend |
| A2 | 4 - 7 | absorbierend |
| A3 | 8 - 11 | hoch absorbierend |
| A4 | >11 | |

Tabelle 6 Absorptionsgruppen; Quelle: ZTV-Lsw-06

In den Unterlagen der DEGES, speziell dem Feststellungsentwurf für den Neubau der Bundesautobahn A14 zwischen den Landesgrenzen zu Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern im Teilabschnitt der Verkehrseinheit (VKE) 1154 zwischen der Anschlussstelle (AS) Wittenberge (mit AS) und der AS Karstädt (ohne AS), von Bau-km 2+000,000 bis Bau-km 19+776,917 einschließlich Lärmschutz und landschaftspflegerischer Begleitmaßnahmen) vom 28.03.2018 werden im Bereich der Kapitel 4.8 Lärmschutzanlagen die jeweiligen Absorptionseigenschaften der jeweiligen, geplanten Teilstücke angegeben. Bis auf den Baukilometer 0+280 – 0+442 (Seite B195) werden von allen LSW die Absorptionsgruppen „hochabsorbierend“ (entspricht A3, A4) gefordert:

4.8 Lärmschutzanlagen

In folgenden Bereichen sind Lärmschutzwände und Lärmschutzwall vorgesehen. Sämtliche Lärmschutzwände werden an der A 14 geplant. Der Lärmschutzwall wird an der B 195 im Zuge der verlegten Bundesstraße errichtet.

| Lfd. Nr. | Lärmschutzanlage | Bau-km von-bis | Lage/Seite | Länge | max. Höhe | Absorptionseigenschaft |
|----------|------------------|-----------------|------------|-------|-----------|-----------------------------|
| 03 | Lärmschutzwall | 0+280 – 0+442 | B195 | 162 | 3 | |
| 2.1 | Lärmschutzwand | 2+256 – 2+435 | links | 186 | 5 | beidseitig hochabsorbierend |
| 2.2 | Lärmschutzwand | 2+406 – 2+700 | links | 347 | 6 | beidseitig hochabsorbierend |
| 07 | Lärmschutzwand | 5+770 – 6+720 | rechts | 935 | 2-4 | einseitig hochabsorbierend |
| 09 | Lärmschutzwand | 12+040 – 12+453 | links | 419 | 7 | beidseitig hochabsorbierend |
| 11 | Lärmschutzwand | 15+220 – 15+789 | links | 568 | 7 | beidseitig hochabsorbierend |

Tabelle 7 Lärmschutzanlagen

11.1.2.2. Vorläufiges Fazit

Die bisher getesteten Lehmoberflächen können gesamt der Absorptionsgruppe A1 zugeordnet werden. Damit wären sie generell befähigt, für Lärmschutzmaßnahmen eingesetzt zu werden, wenn nicht erhöhte Forderungen bestehen.

Soweit die im o.g. Feststellungsentwurf aufgeführte Absorptionsgruppe noch als verpflichtend gelten (A3, A4) – dies muss geprüft werden – so sind folgende Schritte unabdingbar:

- weitere Untersuchungen zum Absorptionsverhalten der geplanten Lehmlärmschutzwände
- Untersuchung von Verbesserungsmöglichkeiten des Absorptionsverhalten
- technische Kompensationsmöglichkeiten
- weitere Maßnahmen

In Bezug auf die getesteten Lehmwände wurde bereits beobachtet, dass Materialkomposition, Textur und Feuchtigkeitsgehalt die Absorption beeinflussen. An dieser Stelle muss weiter ange-setzt werden.

Weitere Testreihen sind nun erforderlich, unter anderem eine Ergänzung durch den in der Norm DIN CEN/TS 1753 Teil 05 beschriebenen ‚Adrienne-Test‘³.

Die vorgenommenen Prüfungen erlauben jedoch eine erste Einschätzung der schallakustischen Eigenschaften von Lehm-Schallschutzwänden. Diese bestätigen die Erwartung, dass diese mit konventionellen Verfahren vergleichbar sind.

³ **Definition Adrienne Test** (wird von der BAST durchgeführt):

Die Adrienne Methode nach DIN EN 1793-4 und DIN EN 16272-4, DIN EN 1793-5 als auch DIN EN 1793-6 und DIN EN 16272-6.

Mit Hilfe eines Adapters kann sowohl der Schallabsorptionsgrad einer Fahrbahnoberfläche nach DIN ISO 13472-1 in situ als auch der Schallabsorptionsgrad einer Lärmschutzwand nach DIN CEN/TS 1793-5 zerstörungsfrei bestimmt werden.

11.2. Bauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Schallabsorption

Die Schallabsorption kann durch Vergrößerung der Oberfläche (zerklüftete Fläche) und freiliegendes organisches Material verbessert werden.

Schalldämmung

Die nahezu komplette Abschirmung von Lärm durch massive Lehmwände beruht auf Erfahrungswerten. Für eine Messung der schalldämmenden Wirkung ist eine Wandfläche mit den Mindestmaßen 4 × 4 Meter nötig. Solche Messungen sind Thema der Folgeforschung.

11.2.1. Stampflehm

Das organische Material an der Wandoberfläche der autobahnzugewandten Seite erzeugt schon ab der Bauphase eine zerklüftete Oberfläche. Wenn das organische Material im Laufe der Zeit verwittert, hinterbleibt ebenfalls eine zerklüftete Oberfläche.



Abb. 70 Eine noch nicht vorerodierte Hackschnitzel-Lehm-Oberfläche. Foto Martin Rauch

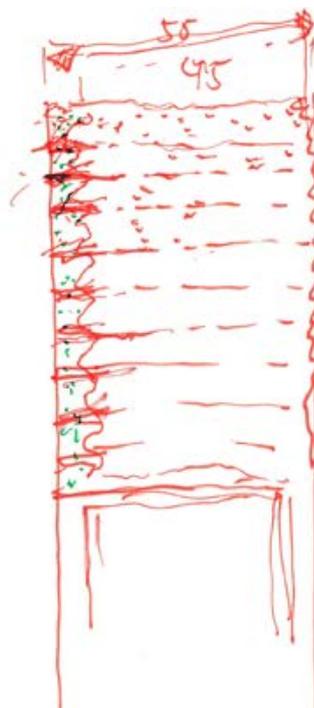


Abb. 71 Beispiel: Für die absorbierende(n) Seite(n) werden ca. 10 cm Holz-Hackschnitzel-Lehmgemisch zwischen Trasskalklagen eingestampft. Die Wände werden vorerodiert; übrig bleibt eine stark zerklüftete Oberfläche. Skizze Martin Rauch

11.2.2. Wellerlehm

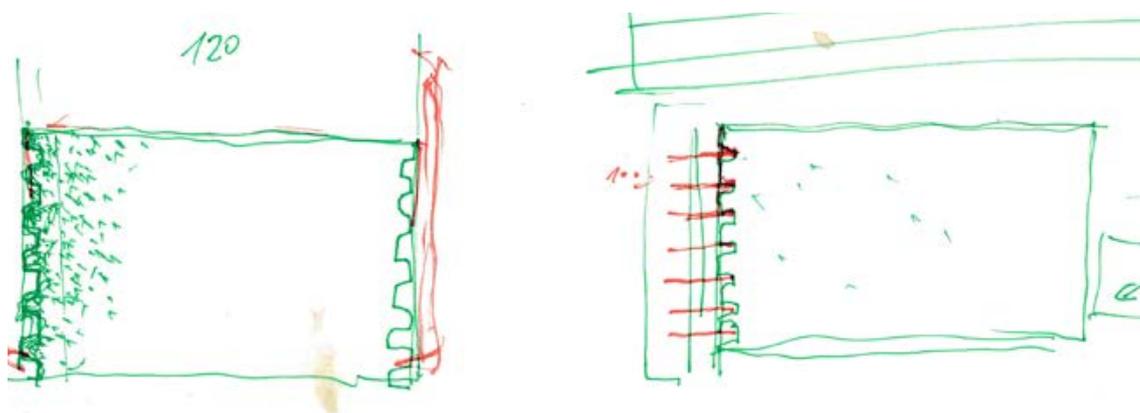


Abb. 72 Die gepressten Wellerlehmblöcke werden mit einer Fräse ca. 10 cm tief eingefräst. Die Wand wird vorerodiert. Übrig bleibt eine stark zerklüftete Oberfläche. Skizzen Martin Rauch

11.3. Akustikmessungen der Bundesanstalt für Straßenwesen

Michael Chudalla, Fabio Strigari (BAST)

11.3.1. Lehlärmschutz – akustische Eigenschaften

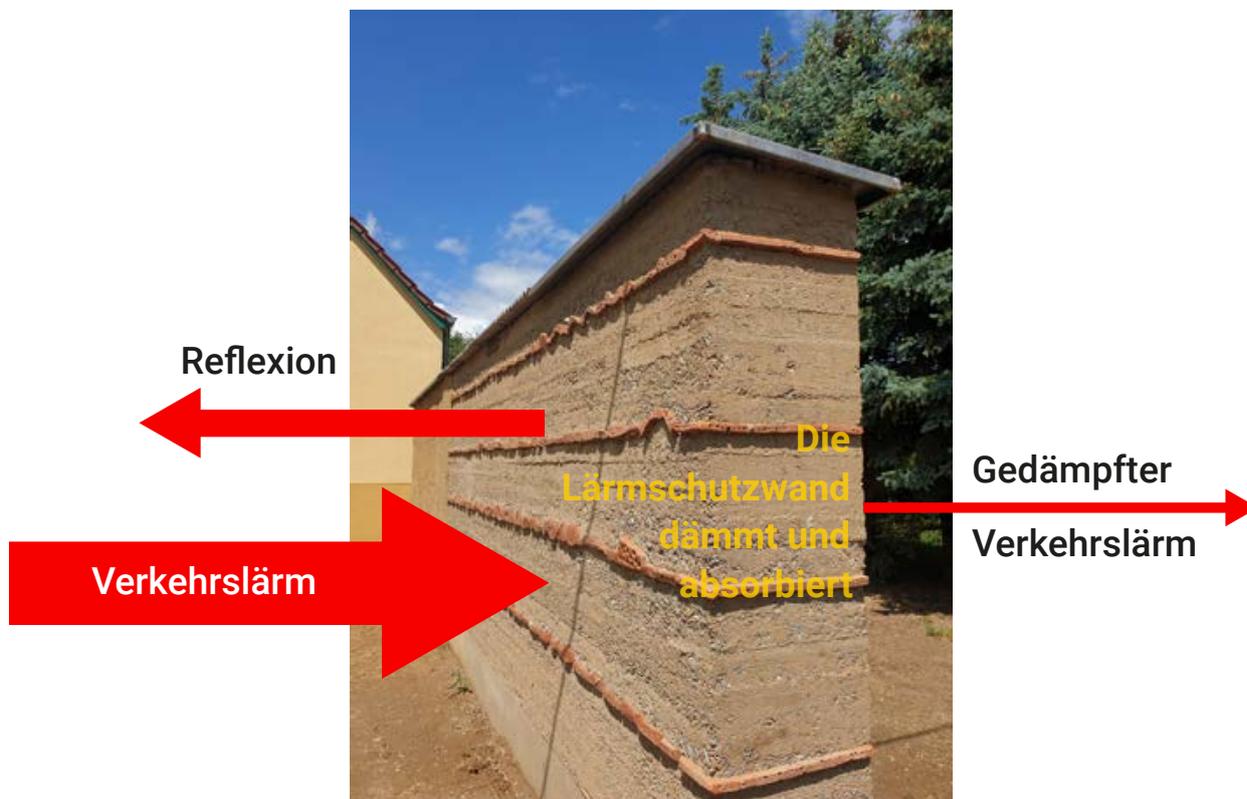


Abb. 73 Vom Verkehrslärm wird ein Teil an der Wand reflektiert, ein Teil geht in die Wand hinein. Davon wird wiederum ein Teil in der Wand absorbiert. Was nicht absorbiert wird, tritt als transmittierte Energie auf der anderen Seite wieder aus. Das Verhältnis zwischen transmittierter Energie und auftretender Energie ist das Maß für die *Schalldämmung* einer Wand. Das Verhältnis zwischen auftretender Energie und reflektierter Energie ist das Maß für die *Schallabsorption*. Foto Ute Reeh, Grafik BAST, Sebastian Bertalan

11.3.2. Messmethode

Die Messung wurde mittels Impedanzmessrohr durchgeführt, in das die Proben eingeführt werden. Am rechten Ende des Rohrs ist die Probe. Auf der anderen Seite ist der Lautsprecher mit einem Signalgenerator, dort wird ein Rauschsignal erzeugt. Die Probe wird in einem geschlossenen

Rohr beschallt. Über zwei Mikrophone werden die hin- und rücklaufenden Schallwellen gemessen, dadurch wird die frequenzabhängige Absorption gemessen.



Abb. 74 Messung mittels Impedanzmessrohr. Foto BAST

11.3.3. Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Absorptionsfähigkeit

Hanf kalk

Hanf kalk (oder Hanfbeton, ein sogenannter Agrarbeton) ist ein Verbundwerkstoff aus Hanf-Leichtholz und Kalk als Bindemittel.

Hanf kalk ist durch seinen hohen Leichtholzanteil ein kohlenstoffbindendes Material. Es hat durch seine Porosität (eingeschlossene Luftkammern) sehr gute Schallabsorptionseigenschaften. Diese variieren je nach Grad der Verdichtung.

Holz wolle-Leichtbauplatten (magnesitgebundene Holz wolle, Heraklith)

Dem Hanf kalk vom Prinzip und den Materialien sehr ähnlich ist Heraklith, dessen faseriger und hohlraum erzeugender Materialanteil aus Holz wolle besteht. Damit bindet auch Heraklith Kohlenstoff und weist eine günstige CO₂-Bilanz auf.

Heraklith ist ein Markenname für HWL-Platten (Holz wolle-Leichtbauplatten) ein Material aus magnesit- oder zementgebundener Holz wolle, das als Platten in der Akustik oder als Putzträger verwendet wird.

Bei Stampflehmwänden können HWL-Elemente als Erosionsbremsen eingesetzt werden. Es sind horizontal in eine Stampflehmwand eingestampfte Streifen. In der Regel sind sie nur 10 Zentimeter tief. Durch die Heraklith-Streifen hat die Stampflehmwand weniger reflektierende und mehr absorbierende Oberfläche.

Integrierte, hohlraumbildende organische Strukturen

Reet, bzw. Schilfrohr ist stellt ein Material dar, das durch seine Hohlräume die Absorptionsfähigkeit von Lehm stark erhöht. Es ist unter den organischen Materialien auch besonders dauerhaft und weist eine hohe Festigkeit auf, zudem besteht durch seine traditionelle Verwendung für Dächer sowohl Erfahrung mit dem Material als auch Verfügbarkeit.

Natürliche Aufrauung

Sowohl Wellerlehm- als auch Stampflehmwände kriegen durch Oberflächenerosion im Laufe einiger Jahre stark texturierte Oberflächen. Inwiefern diese natürliche Aufrauung Schallreflexion durch Streuung reduziert, ist ein weiterer Untersuchungsgegenstand.

11.3.4. Messergebnisse



Abb. 75 Foto, das die vielversprechendsten Probekörper zeigt. Links der Lehmschlicker mit Schilfhalmern, in der Mitte Stampflehm mit der HWL-Platte (Holzwolle/Magnesit) und rechts ein Stück des Hanfkalk-Probekörpers. Fotos BAST

Magnesitgebundene Holzwolle (HWL), eingebettete Schilfhalm

Im Diagramm (Abb. 76) zeigt die violette Kurve das Messergebnis der Stampflehmprobe. Sie befindet sich nur knapp über der Null-Linie. Diese Probe absorbiert also praktisch gar nicht, sondern reflektiert nur. Im Gegensatz dazu hat die rote Kurve der Heraklith-Probe (HWL) zwei ausgeprägte Maxima, die noch ausbaufähig sind, und beim Schallabsorptionskoeffizient bis maximal 0,7 liegen. (Bei einem Koeffizient von 1 wird alles absorbiert). Sie liegen auch noch nicht im richtigen Frequenzbereich des Verkehrslärmspektrums, aber das wäre eine Optimierung die man, denke ich, hinbekommen kann. Dafür sind noch weitere Optimierungsgänge nötig. In Blau sieht man den Lehmschlicker mit dem Schilf. Dort sehen Sie ein Maximum, das bis 0,6, reicht und bei 750 Hertz. Das ist ein Stück zu niedrig, da wir gerne bei 1 Kilohertz liegen würden.

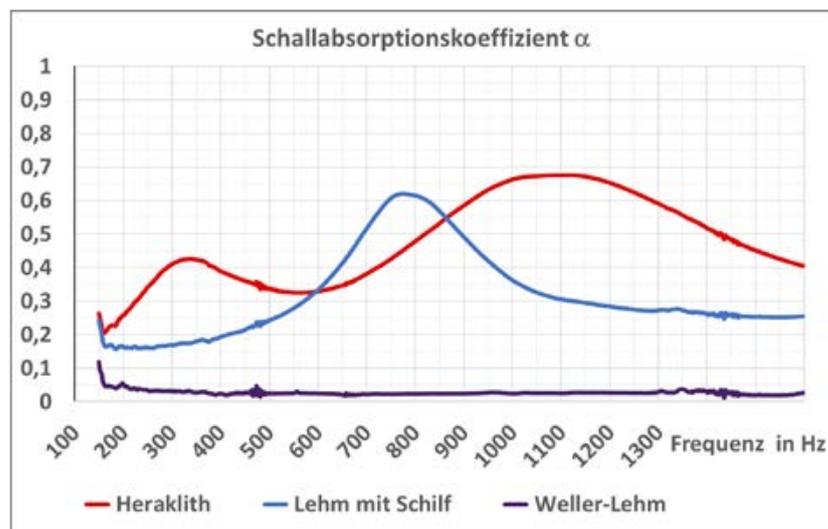


Abb. 76 Diagramm Schallabsorptionsmessung Proben Wellerlehmoberfläche (violett), Lehm mit senkrecht zur Oberfläche integrierten Schilfhalmern (blau), Stampflehm mit integrierter HWL-Platte. Grafik BAST

Die Proben sind von einer bestimmten Dimension, etwa 10 hoch. Die Dimension spielt eine Rolle. Deshalb ist das Messergebnis nicht eins zu eins übertragbar auf eine Lehm-Lärmschutzwand. Die Höhe der Probe hat einen Einfluss darauf, in welchem Frequenzbereich die Absorption stattfindet.

Ergänzend wäre noch eine Messung mit einer Probe von 10 Zentimeter Durchmesser denkbar, in der ausschließlich HWL enthalten ist, ohne Stein. Dann könnte man auch das Verhältnis besser abschätzen, wie viel HWL auf eine bestimmte Fläche Lärmschutzwand müsste, um ausreichende Absorption zu erzielen.

Hanfalk



Abb. 77 Hanfkalkprobe. Foto BAST

Es wurden Proben in unterschiedlichen Höhen gemessen. Die Ausgangsprobe von 11 Zentimetern hat ihr Maximum bei etwas über 400 Hertz, die 6,4-Zentimeter-Probe bei etwa 650 Hertz, die 4-Zentimeter-Probe bei 1100 Hertz. Diese geht im Koeffizienten bis zum Maximum von 1 hoch. Die anderen gehen bis 0,95. Hier wird bei diesen Frequenzen nahezu alles absorbiert und nichts zurückgeworfen. Das ist eine Probe, die gut wirkt.

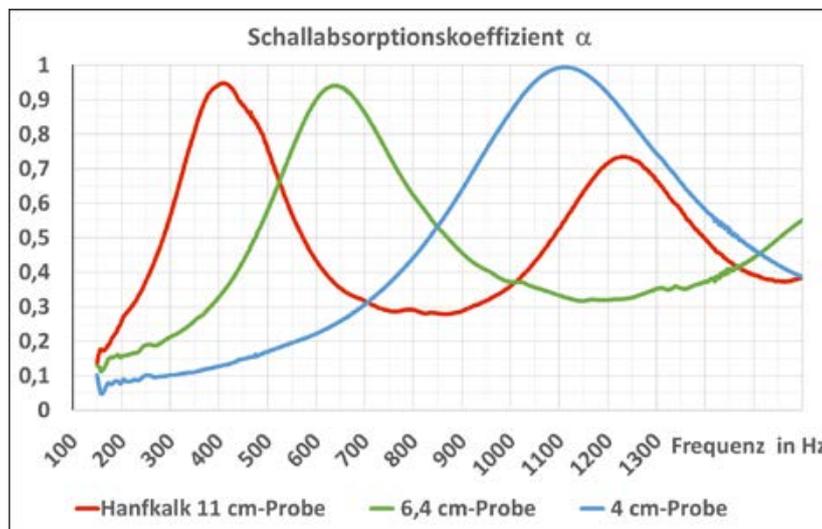


Abb. 78 Diagramm der Schallmessungen mit Hanfkalkproben unterschiedlicher Höhe. Grafik BAST

Man muss bei den Begriffen unterscheiden. „Glatt“ und „porös“ gehören als Begrifflichkeiten nicht zusammen, sondern „glatt“ und „rau“. Lehm ist nicht glatt, aber er ist rau. Porös ist er, wenn er Lufteinschlüsse hat und die hat er eher nicht. Und die Lufteinschlüsse sind auch nicht zusammenhängend, so dass keine Kanäle entstehen.

„Porös“ und „offenporig“ bezeichnen auch nicht dasselbe. Man kann sich das so vorstellen: Porös sind zum Beispiel Matratzen mit vielen kleinen Bläschen, die nicht zusammenhängen. Ein Schwamm ist auch porös aber auch offenporig, denn er kann Wasser aufnehmen.

Die Hanfkalkprobe ist da ein gutes Beispiel. Genau so sieht offenporiger, also lärmärmer, Asphalt aus. Auch die Absorptionskurve erinnert sehr an offenporigen Asphalt. Aus akustischer Sicht für den Verkehrslärm ist das eine sehr gute Porengröße.

11.3.5. Reproduzierbarkeit, zukünftige Messungen

Das, was erreicht worden ist, muss reproduziert werden können und weiter verbessert. Dazu muss vor der Probenfertigung eine Rezeptur festgelegt und möglichst genau beschrieben wer-

den (Gewicht, Volumen). Dazu müssen Gewichts-/Mengenangaben bei der Herstellung erfasst werden sowie differenzierende Angaben (etwa Korngrößen).

Speziell beim HWL (bzw. Heraklith) hat nicht nur die Gesamthöhe der Probe einen Einfluss, sondern auch, wie tief das HWL in die Probe eingelassen ist. Man könnte sich auch vorstellen, dass man das Heraklith schräg in die Wand einbaut und dann verschiedene Tiefen hat. Das könnte beispielsweise das Absorptionsmaximum verbreitern. Weil jede Tiefe des Absorptionsmaterials eine andere Absorptionsfrequenz hervorrufen würde.

Beim Wellerlehm mit Schilfhalmen wäre interessant festzustellen, wie viele Halme man anteilig, d.h. pro bestimmte Oberfläche in die Wand integrieren müsste, um einen akzeptablen Wert zu erhalten. Man ist ja da relativ begrenzt. Denn die Stabilität und Druckfestigkeit wird ja durch die Halme stark zurückgesetzt. Wenn man so einen Versuch weiterführen will, müsste man ein bestimmtes Verhältnis anvisieren, das sinnvoll ist. Zu viele Halme gehen im Weller gar nicht.

11.3.6. Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse, mechanische Stabilität

Die Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse ist sehr wichtig. Es müssen nicht nur die akustischen Eigenschaften erfüllt sein, sondern auch die nicht-akustischen. Das hat auch etwas mit Beständigkeit über lange Zeiträume zu tun. Es ist noch nicht geklärt, ob HWL-Platten nicht feuchtigkeitsempfindlich sind. Alles, was an der Lärmschutzwand absorbierend verarbeitet werden soll, sollte auch beständig sein gegen Feuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel. Dasselbe gilt auch für mechanische Beanspruchung. Wenn irgendetwas gegen so eine Wand fliegt, darf nichts Gefährliches davon abbröckeln.

Teil III: Ökologie und Nachhaltigkeit

Hochgeklappter Naturschutz – gefährdete Arten – Flächenkonflikte – Trittsteinbiotop – Lebensraum – Bienensteine – Bienen- und Vogellehm – Fledermausquartiere – Monitoringkonzept – Ausgleichsmaßnahme – §15 BnatSchG – Lehm – Umnutzung – Boden – Fremdstabilisierung – Ökobilanzierung – LCA

Die auf den nachfolgenden Seiten dargestellten Untersuchungen betreffen: 1. die ökologische Funktion der Lehmlärmschutzwand als Lebensraum für spezialisierte Arten; 2. die Nachhaltigkeitsaspekte des Materials „Lehm“ und der damit einhergehenden Bauweise.

1. Als „hochgeklapptes Flächenangebot“ (12.2) könnte der vorgeschlagene Lehmbau die für gefährdete Tier- und Insektenarten (Tabelle 8; 12.3.5) schwindenden Standortmosaiken substituieren (12.1) und zeitgleich Flächenkonflikten mit Agrarwirt*innen vorbeugen. Darüber hinaus hat die von uns vorgeschlagene Maßnahme das Potential als wichtiger Trittstein im Biotopverbund der Prignitz zu fungieren (12.3.1).

Um als ökologisch wertvoller Standort wirksam werden zu können, werden jedoch spezifische Ausstattungselemente benötigt (12.3.4). Zu diesem Zweck haben wir verschiedene Technologien entwickelt; ‚Bienensteine‘, ‚Bienen- und Vogellehm‘, verschiedene Lochungen, Materialeinsätze und Fledermausquartiere gewährleisten die Funktion der Lehmlärmschutzwand als hochwertiger Biotopbaustein. All diese Maßnahmen beziehen sich ausschließlich auf die verkehrsabgewandte Wandseite. Zur Vermeidung von Kollisionsrisiken ist es notwendig, die verkehrszugewandte Seite der Lärmschutzwand für diese Arten lebensfeindlich zu gestalten und spezifische Anforderungen an stationäre Beleuchtungseinrichtungen zu beachten (12.5.3).

Um den ökologischen Mehrwert des Bauprojektes langfristig und unabhängig sicherzustellen, empfehlen wir eine wissenschaftliche Begleitung und Überwachung der Ansiedlungstätigkeiten auf Grundlage eines Monitoringkonzepts (12.5.2.1).

Den obigen Annahmen liegen Analysen der lokal vorkommenden gefährdeten Arten und ihrer Nistpraktiken (12.3.2), ihren möglichen Flugrouten (12.3.3) und der im Umkreis vorhandenen Futterpflanzen (12.5.1) zugrunde. Außerdem wurde die Einbindung des Bauwerks in das Lebensraumnetzwerk der Umgebung betrachtet (12.5).

Die Einstufung der Lehmlärmschutzwand als Ausgleichsmaßnahme gemäß §15 BnatSchG wurde von uns diskutiert (12.4).

2. Lehm ist ein in Europa sehr häufiges, im Boden örtlich vorhandenes Material (13.1; Abb. 86). Bestandteil unserer Konzeption der Lehmlärmschutzwand ist, das regional entstehende Aushubmaterial der Trassierungsarbeiten für den Bau von Träger- und Schwerlastwänden umzunutzen; die dazu erforderlichen Kalkulationen sind angestellt worden (13.3). Entgegen einiger Entwicklungen der letzten Jahrzehnte verzichten wir auf die ökologisch nachteilige Fremdstabilisierung des Baustoffes durch Stabilisierungsmittel (13.2). Vielmehr setzen wir auf die von uns entwickelten und erprobten industriellen Verfahrenstechniken, sowie neue Technologien der Montage und der Durchführung von Lehmbaustellen, um das Material zukunftsweisend einzusetzen (6; 9; 13.2).

Eine Ökobilanzierung (gem. DIN EN 15804) bestätigt, dass sich die vorgeschlagene Bauweise in ihrer Gesamtbilanz gegenüber konventionellen Verfahren durchsetzt und somit den nationalen, europäischen und globalen Zielen entspricht. Gemäß dem Verfahren einer Lebenszyklus-Analyse beinhalten die Berechnungen auf Grundlage des GWP-Indikators (Global Warming Potential) den gesamten Bauprozess von der Herstellungs- bis zur Recyclingphase (14.3). Die Tatsachen, dass Lehm das einzige mineralische, unbegrenzt wiederverwendbare Baumaterial ist und er keine Schadstoffe abgibt, wirken sich hier positiv auf die Berechnungen aus. In Bezug auf die Aktualität der zur Verfügung stehenden Datenbank (BBR: OBD_2020_II) stellen sich noch einige Fragen, da Lehmbauweisen hier scheinbar unterrepräsentiert und nur lückenhaft erfasst sind (13.1).

12. Ökologische Funktion als Lebensraum für spezialisierte Arten

12.1. Ökologisches Lebensraumpotenzial

Die Arbeitshypothese ist, dass eine Lärmschutzwand aus Lehm unabhängig von ihrer Bauweise in der durch Intensivnutzungen geprägten Agrarlandschaft zusätzlichen Lebensraum bietet insbesondere für stark im Rückgang befindliche spezialisierte Insektenarten. Insofern hätten Lehm-bau-Lärmschutzwände das Potenzial, über große Teile ihrer vertikalen, ggf. durch Vorsprünge, Rücksprünge etc. strukturierte Fläche hinweg gesamtäumlich ökologische Ausgleichswirkungen zu erzeugen. Diese Fragestellung wird vorrangig durch Aussagen über die tatsächliche Besiedlung der Wände und die Bestandsentwicklung des betroffenen Raumes zu beantworten sein.

Die ökologische Bedeutung von Lehmbauten ist grundsätzlich hoch, insbesondere da sie eine historische Bauform darstellt und traditionell auch im Zusammenhang mit der Toleranz für gewisse Erosionsprozesse ein hohes Lebensraumangebot für Insekten bietet. Außerdem bieten sie unter Umständen ähnliche Lebensraumqualitäten an, wie sie an zumeist stark besonnten Steilwänden und Abbruchkanten herrschen. Eine hervorragend wichtige Artengruppe mit Indikatorfunktion für die naturschutzfachliche Bedeutung dieser selten gewordenen Lebensraumkomplexe ist die der Wildbienen. Lehmbauten bieten mit entsprechenden Vorbereitungsmaßnahmen wie vorgefertigte Röhren und Hohlräume potenzielle Nistmöglichkeiten für zahlreiche gefährdete Wildbienenarten, aber auch andere Insektenarten. Aber sie sind insbesondere dann ein hochwertiger Biotopbaustein, wenn das Bauwerk weiche Lehmelemente integriert, die eine Ansiedlung von Wildbienenarten erlauben, die sich selbst grabend Nester anlegen.

Das beschriebene ökologische Potenzial eines vertikalen Bauwerks aus Lehm steht dabei zunächst unabhängig neben der Fragestellung, ob eine Lärmschutzwand in Lehmbauweise als Bestandteil einer geplanten Autobahn im strengen Sinne der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung gemäß § 15 BNatSchG als Ausgleichsmaßnahme einsetzbar und anrechenbar sein kann. Dabei ginge es dann um die Frage, ob durch den Bau der Autobahn ein qualitativ vergleichbarer Verlust oder eine qualitativ vergleichbare Beeinträchtigung entstanden ist, der konkret ausgleichbar wäre durch die potenzielle Besiedlung durch Tier- und ggf. auch Pflanzenarten und ggf. weitere Vergleichsaspekte ökologischer Art..

Durch die Intensivierung der Landwirtschaft und einer zunehmenden Homogenisierung der Kulturlandschaften verschwinden solch wichtige Standortmosaiken aus unserer natürlichen Umgebung. Die Arten, die auf diesen speziellen Lebensraum angewiesen sind, sind deshalb überwiegend stark gefährdet, da sie keine Alternativen vorfinden. Am Vorbild dieser natürlichen Lebensräume soll sich das bauliche und gestalterische Maßnahmenkonzept nach Möglichkeit ausrichten.

Die Lehmlärmschutzwand muss in erster Linie ihrem Zweck dienen, die geforderte Reduzierung des Lärms an den Immissionspunkten nach Maßgabe des Rechts zu erreichen. Sie muss weiteren Anforderungen wie normgerechte Standfestigkeit und auch diversen Gestaltungsansprüchen genügen. Hinsichtlich der Gestaltung ist zu unterscheiden zwischen der verkehrszugewandten, nach Osten weisenden Seite, und der verkehrsabgewandten, nach Westen ausgerichteten Seite (Siedlung). Verkehrsseitig muss aus ökologischer Sicht Priorität haben, besiedlungsfeindlich konzipiert zu sein, damit die potenzielle Besiedlung durch Insekten, Vögel und andere Tierarten sowie das Anlocken potenzieller Jäger nicht dazu führt, dass zusätzliche Kollisions- und Tötungsrisiken entstehen.

Die verkehrsabgewandte Seite kann demgegenüber so errichtet und gestaltet werden, dass das ökologische Potenzial dieses technischen Bauwerkes in Lehmbauweise optimal zur Entfaltung kommt. Das Potenzial liegt vor allem darin, ein in der dynamischen Naturlandschaft typisches und inzwischen selten gewordenes Lebensraumelement zumindest näherungsweise nachzubilden zu können. Es handelt sich um je nach Sonneneinstrahlung thermisch mehr oder weniger begünstigte Standorte wie Steilwände und Abbruchkanten, die vor allem die Fließgewässer von Elbe und Nebenflüssen regelmäßig neu schaffen. Aber auch vergleichbare vom Menschen geschaffene Lebensräume wie Steilwände in Kies-, Sand- und Tongruben gehören in diese Gruppe. Sie werden

von wärmeliebenden Tierarten als Lebensraum, Brutplatz oder auch Jagdrevier besucht, die in der zumeist intensiv genutzten Landschaft nur ungenügend adäquaten Lebensraum finden.

12.2. Idee des „hochgeklappten“ Naturschutzes

Die Etablierung von Maßnahmen des Naturschutzes, z.B. die Anlage von Blühstreifen, die Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzungen zugunsten von artenreicheren Lebensgemeinschaften oder von Tierlebensräumen (z.B. Feldhamster, Feldlerchenfenster) führt in der intensiv genutzten Kulturlandschaft nicht selten zu Flächenkonflikten. Häufig sind erst Eingriffsvorhaben, z.B. der Straßenbau, der Ansatzpunkt zur Realisierung von Naturschutzmaßnahmen, weil naturschutzrechtlich geforderte Kompensationsmaßnahmen gezielt eingesetzt werden können. Die Landwirtschaft demgegenüber beklagt, dass ihr die Anbaufläche nicht nur durch die geplante Infrastrukturmaßnahmen verloren geht, sondern zudem auch noch durch die naturschutzrechtlichen Kompensationserfordernisse. Entsprechend besteht seitens der Landwirtschaft großes Interesse, Naturschutz „platzsparend“ zu unterstützen.

Vor dem Hintergrund des hohen Nutzungsdrucks steht der innovative Ansatz einer naturschutzfachlich optimierten Lärmschutzwand. Das „hochgeklappte“ Flächenangebot an Lebensraum in und an einem in der jeweiligen Region gewonnenen Baustoff ist dazu geeignet, der ökologischen Verarmung an Arten entgegenzuwirken, ohne dafür weitere Flächen aus der Nutzung zu nehmen. Das funktionale Bauwerk einer Lehmwand, sei sie nun als Lärmschutzwand bis zu 7 m hoch geplant oder als die regionale Baukultur widerspiegelndes Gestaltungselement mit geringerer Höhe, soll und kann entsprechend ökologisch optimiert werden.

Dabei handelt es sich erst einmal nicht um ein Naturschutzprojekt in engerem Sinne, sondern um ein Bauwerk, das primär die Lärmbelastung reduzieren soll, das aber im Sinne der ökologischen Aspekte wesentlich zielführender ist als der konventionelle Lärmschutz. In erweitertem Sinn soll das Bauwerk aber auch der Region (lokale Firmen, wirtschaftliche Aspekte) zugute kommen und einen Schritt weiter in ökologischem Sinn gedacht werden (Blühstreifen, Hecken, etc.), d.h. Lebensraumqualität für Insekten und Tiere.

Der Mehrwert dieses Bauwerks gegenüber einer konventionellen Lärmschutzwand besteht im Wesentlichen aus dessen positiver Ökobilanz.

12.3. Lehmwand als Lebensraum für spezialisierte Arten im regionalen Biotopverbund

Sonnenbeschienene Steilwände stellen in einer natürlichen Umgebung für viele Tiergruppen außerordentliche Niststrukturen zur Verfügung. Vertikale Strukturen aus Löss, Sand und Lehm beherbergen oftmals diverse Artengemeinschaften, die solche Lebensraumelemente ausschließlich oder bevorzugt besiedeln (Wiesbauer 2009)⁴. Aufgrund von landschaftlichen Umwandlungsprozessen, Flussbegradigungen und dem großflächigen Anbau von Monokulturen werden natürliche Steilwände und Abbruchkanten in Kulturlandschaften zunehmend seltener. Darüber hinaus fallen lehmverfugte Mauern und Wände, die als Sekundärhabitats artenreich besiedelt werden können, oftmals Sanierungsmaßnahmen zum Opfer und werden als Lebensraum unbrauchbar oder zerstört. Doch gerade für auf vertikale Strukturen spezialisierte Tiere sind solche Lebensraumelemente überlebenswichtig (Wiesbauer 2009). Die Zerstörung von natürlich vorkommenden Steilwänden und Abbruchkanten sind für einige Arten existenzbedrohend, da ein Ausweichen auf andere Strukturen für viele Spezialisten nicht möglich ist (Westrich 2019).

12.3.1. Die Lärmschutzwand als Trittsteinbiotop im Ökosystem

Ein Bauwerk aus Lehm kann Eigenschaften aufweisen, die vergleichbar sind mit natürlichen oder anderen von Menschen hergestellten Biotopen. Die Lärmschutzwand, insbesondere aufgrund

4 Quellen zu diesem Abschnitt auf Seite 102

der eingearbeiteten Elemente Bienenstein und Bienenlehm, steht über ihre Bewohner in einem Verbund mit ähnlichen spezifischen Lebensräumen in der Umgebung. Vergleichbare Lebensräume sind natürliche Lehmwände bzw. -anschnitte, wie sie z.B. im Bereich von nicht kanalisierten Flussläufen neu entstehen können, oder künstlich geschaffene, wie z.B. Häuser in Lehmbauweise, Hohlwege oder Ton-, Lehm- und Sandgruben. Die dort siedelnde Fauna, insbesondere die spezialisierten Insekten, wie die Wildbienen, können vergleichbare Lebensraumangebote im Flug erreichen und besiedeln. Lehmstandorte sind dabei eher punktuell in der Landschaft verteilt, jeder einzelne Standort fungiert als ökologischer Trittstein im Biotopverbund.

Der Gebietskontext der Lehmwände an der A14, naturräumlich die Perleberger Heide und die Prignitz, weist in gewissem Umfang vergleichbare Landschaftselemente auf, so dass davon auszugehen ist, dass das Lebensraumangebot der Lehmwand mit hoher Wahrscheinlichkeit standortspezifisch besiedelt werden wird. Das Landschaftsschutzgebiet „Agrarlandschaft Prignitz-Stepenitz“ umfasst u.a. an Löcknitz, Stepenitz und Nebenflüssen, die das Gebiet gliedern und verbinden, auch unverbaute, strukturreiche und naturnahe Abschnitte, eine ausgeprägte Gewässerdynamik mit Mäander- und Kolkbildungen, Uferabbrüchen, Steilwandbildungen etc., die sowohl einer entsprechenden Insektenwelt als auch Uferschwalbe und Eisvogel Lebensraum geben können (s. LSG-Verordnung v. 15.12.2008). Die Umgebung weist auch aufgrund der traditionellen Bauweisen mit Lehm kleine und größere Entnahmestellen, gealterte und frische Lehmwände auf. Hinzu kommen zahlreiche in Lehmbauweise errichtete Gebäude, so dass mit der Lärmschutzkonstruktion in Lehmbauweise ein neuer und wertvoller Trittstein im Lebensraumnetzwerk der einschlägigen Fauna ergänzt wird.

12.3.2. Artenspektrum und Gefährdungsgrad

Vertikale Lehmstrukturen beherbergen in natürlichen und naturnahen Lebensräumen oftmals ein diverses Artenspektrum (Wiesbauer 2009). Nachfolgend werden potenzielle Besiedler (Fokus Insektenfauna: Wildbienen) einer künstlich erstellten Lehmstruktur aufgezeigt (Westrich 2019) mit Angaben zum Gefährdungsstatus in Brandenburg (BB) und Deutschland (D). Da Wildbienen neben ihrer Vielfalt in Form und Farbe sich auch stark hinsichtlich ihrer Niststrategie, bevorzugten Habitaten und besuchten Blüten unterscheiden (Deutsche Wildtier Stiftung 2016), werden nachfolgend diesbezüglich artspezifische Angaben dargelegt.

Gefährdung

Die Angaben zu den Gefährdungskategorien wurden den Roten Listen Brandenburgs (Saure 2005, Dathe & Saure 2000) und Deutschlands (Westrich et al. 2011) entnommen mit folgender Zuordnung:

0 = Ausgestorben; 1 = Vom Aussterben bedroht; 2 = Stark gefährdet; 3 = Gefährdet; G = Gefährdung anzunehmen; V= Vorwarnliste; D = Daten defizitär; * = nicht gefährdet.

Spezialisierung

Im Rahmen dieser Zuordnung (Westrich 2019) wird unterschieden in oligolektische (Pollenspezialisierung) und polylektische Arten (Pollengeneralisten) sowie Kuckucksbienen. Letztere sammeln keinen Pollen, sondern benötigen lediglich Nektar zur Eigenversorgung. Hierbei bezieht sich der spezialisierte Blütenbesuch auf das Sammeln von Pollen (Westrich 2019).

Vorzugshabitate

Wildbienen leben in unterschiedlichen Lebensräumen und benötigen hierbei artspezifische Habitatstrukturen. Folgende Biotoptypen werden nachfolgend aufgeführt:

G, GS = Grünland, Staudenfluren; GT, GST = Grünland u. Staudenfluren vorwiegend in trockener Ausprägung; R = anthropogene Rohbodenstandorte und Ruderalflächen; H = Zwergstrauchheiden; B, WG = Laubgebüsche, Feldgehölze, Streuobstwiesen, Waldmäntel, WK, WT = trockenwarme Kiefern- und Eichenmischwälder; AD = Binnendünen; AT, AW = trockene Gruben und Sand-, Mer-

gel- oder Lehmwände; FR, SR = Röhrichte; MA, MM, WM, WW = Moore, Moor- und Bruchwälder, Weiden-Weichholzaunenwälder (Saure 2005).

Ökologischer Typ

Die nachfolgenden aufgeführten Angaben beziehen sich auf unterschiedliche Nistweisen bzw. -strategien. Bei der hypergäischen (hy) Nistweise handelt es sich um nestbauende Arten, die ihre Brutzellen oberirdisch in Totholz, in dünnen Pflanzenstängeln, in Mauerspalt, in leeren Schneckengehäusen bauen oder freistehende Nester anlegen. Endogäisch (en) nistende Arten graben ihre Hohlräume selbst oder nutzen vorhandene unterirdische Hohlräume im Erdboden, aber auch Abbruchkanten und Steilwände. Parasitische (par) Insekten, Kuckucksbienen/-wespen, weisen eine schmarotzende Lebensweise auf und legen selber keine Brutzellen an (Saure 2005).

Nestbau

In dieser Spalte wird unterschieden in Arten, die ihre Niststrukturen selbst anlegen und in Arten, die auf vorhandene Strukturen zurückgreifen und keine eigenen Nester bauen (Westrich 2019).

| Artnamen | Deutscher Artnamen | Gefähr. BB/D | Spezialisierung | Vorzugs-habitate | Ökol. Typ | Nestbau |
|----------------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|------------------|-----------|--------------------------------|
| Wildbienen | | | | | | |
| <i>Anthidium manicatum</i> | Garten-Wollbiene | */* | polylektisch | R, P, AT | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Anthidium oblongatum</i> | Spalten-Wollbiene | V/V | polylektisch | R, GT, AT | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Anthidium punctatum</i> | Weißgefleckte Wollbiene | 3/3 | polylektisch | R, GT, AT | en | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Anthophora aestivalis</i> | Streifen-Pelzbiene | 3/3 | polylektisch | AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Anthophora plumipes</i> | Frühlings-Pelzbiene | */* | polylektisch | P, AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Anthophora pubescens</i> | Schuppen-Pelzbiene | 2/1 | polylektisch | k.A. | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Anthophora quadrimaculata</i> | Vierfleck-Pelzbiene | V/V | polylektisch | R, P, AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Anthophora retusa</i> | Rotbürstige Pelzbiene | V/V | polylektisch | R, WG, AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Coelioxys afra</i> | Schuppenhaarige Kegelbiene | 3/3 | Kuckucksbiene | AD, AT, AW | par | Wirte: Megachile-Arten |
| <i>Coelioxys aurolimbata</i> | Goldsaum-Kegelbiene | */V | Kuckucksbiene | R, AD, AT, AW | par | Wirt: Megachile ericetorum |
| <i>Coelioxys conica</i> | Vierzählige Kegelbiene | */V | Kuckucksbiene | R, GT, WG, P, AT | par | Wirte: breites Wirtsspektrum |
| <i>Coelioxys conoidea</i> | Sandrasen-Kegelbiene | */3 | Kuckucksbiene | R, GT, AD, AT | par | Wirte: Megachile-Arten |
| <i>Coelioxys echinata</i> | Stacheltragende Kegelbiene | V/* | Kuckucksbiene | R, WG, AD, AT | par | Wirt: Megachile rotundata |
| <i>Coelioxys elongata</i> | Langschwanz-Kegelbiene | */* | Kuckucksbiene | R, AT | par | Wirt: Megachile-Arten |

| | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------------------|--------------------|-------|--|
| <i>Coelioxys inermis</i> | Unbewehrte Kegelbiene | */* | Kuckucksbiene | R, AT | par | Wirt: Megachile-Arten |
| <i>Coelioxys mandibularis</i> | Mandibel-Kegelbiene | */* | Kuckucksbiene | R, WG, AT | par | Wirt: Megachile- und Osmia-Arten |
| <i>Colletes daviesanus</i> | Buckel-Seidenbiene | */* | oligolektisch: Asteraceae | R, GST, AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Colletes similis</i> | Rainfarn-Seidenbiene | */V | oligolektisch: Asteraceae | R, GST, AT | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Epeolus variegatus</i> | Gewöhnliche Filzbiene | */V | Kuckucksbiene | R, GST, AD, AT | par | Wirt: Colletes-Arten |
| <i>Eucera longicornis</i> | Juni-Langhornbiene | 3/V | oligolektisch: Fabaceae | GT, AT | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Halictus quadricinctus</i> | Vierbindige Furchenbiene | V/3 | polylektisch | R, AT, AW | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Hylaeus hyalinatus</i> | Mauer-Maskenbiene | */* | polylektisch | R, GST, WG, AT, AW | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Lasioglossum laticeps</i> | Breitkopf-Schmalbiene | */* | polylektisch | R, P, AT | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Lasioglossum limbellum</i> | Geriefte Steilwand-Schmalbiene | D/3 | polylektisch | k.A. | en | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Megachile circumcincta</i> | Gebänderte Blattschneiderbiene | */V | polylektisch | GT, AT | en/hy | Selbstgegrabene Hohlräume |
| <i>Megachile ericetorum</i> | Platterbsen-Mörtelbiene | */V | oligolektisch: Fabaceae | R, AD, AT, AW | en | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Megachile lagopoda</i> | Wollfüßige Blattschneiderbiene | 3/2 | polylektisch | GT, AT, AW | en | Selbstgegrabene & vorhandene Hohlräume |
| <i>Megachile pilidens</i> | Filzzahn-Blattschneiderbiene | 3/3 | polylektisch | GT, AT, AW | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Megachile rotundata</i> | Luzerne-Blattschneiderbiene | */* | polylektisch | R, WG, P, AD, AT | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Megachile versicolor</i> | Bunte Blattschneiderbiene | */* | polylektisch | R, WG, P, AT | hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Megachile willughbiella</i> | Garten-Blattschneiderbiene | */* | polylektisch | R, WG, P, AT | en/hy | Selbstgegrabene/genagte Hohlräume |
| <i>Melecta albifrons</i> | Frühlings-Trauerbiene | */* | Kuckucksbiene | P, AT, AW | par | Hauptwirt: Anthophora plumipes |
| <i>Melecta luctuosa</i> | Pracht-Trauerbiene | 3/3 | Kuckucksbiene | AT, AW | par | Hauptwirt: Anthophora aestivalis |
| <i>Osmia adunca</i> | Natterkopf-Mauerbiene | */* | streng oligolektisch: Echium | R, AT, AW | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Osmia bicornis</i> | Rostrote Mauerbiene | */* | polylektisch | B, WG, P, AT, AW | hy | Nutzung vorhandener Strukturen |

| | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----|--------------|--------------|-------|--------------------------------|
| <i>Osmia caerulea</i> | Stahlblaue Mauerbiene | */* | polylektisch | B, WG, P, AT | en/hy | Nutzung vorhandener Strukturen |
| <i>Wespen</i> | | | | | | |
| <i>Auplopus carbonarius</i> | Tönnchenwegwespe | */* | kein Pollen | B, WG, AT, P | hy | Anlage oberirdischer Nester |
| <i>Odynerus spinipes</i> | Gemeine Schornsteinwespe | 3/* | kein Pollen | AT, AW | hy | Anlage oberirdischer Nester |

Tabelle 8

Darüber hinaus könnten auch einige Sandbienenarten (z.B. *Andrena apicata*, *Andrena cineraria*, *clarkella*, *Andrena denticulata*, *Andrena dorsata*, *Andrena flavipes*, *Andrena fulvago*, *Andrena gravaida*, *Andrena haemorrhhoa*, *Andrena helvola*, *Andrena humilis*, *Andrena minutula*, *Andrena minutuloides*, *Andrena nitida*, *Andrena ovatulata*, *Andrena tibialis*, *Andrena vaga*, *Andrena wilkella*), Furchen- und Maskenbienen sowie ihre Kuckucksbienen die Lehmwand aufsuchen. Allerdings bevorzugen sie in der Regel flache bis leicht geneigte Niststrukturen und sandigere Substrate, werden jedoch gelegentlich auch in lehmigem Substrat gesichtet (Westrich 2019). In den vorgefertigten Hohlräumen können sich weitere Hohlraumbesiedler unterschiedlichster Gattungen einnisten. Zudem gibt es diverse weitere Lehm- und Goldwespen sowie Grab-, Falten- und Wegwespen, die eine lehmige Vertikalstruktur als Nistplatz aufsuchen könnten (Wiesbauer 2009).

12.3.3. Darstellung der möglichen Besiedler mit Flugradien, Trachtpflanzen oder Beutetieren etc.

In Deutschland kommen rund 585 Wildbienen vor (Westrich 2018), in Brandenburg sind es um die 383 (Dathe & Saure 2000), von denen nahezu die Hälfte im Bestand als gefährdet eingestuft wird (Deutsche Wildtier Stiftung 2016). Dabei weisen Wildbienen nicht nur eine große Varietät in Form, Größe und Farbe auf, auch hinsichtlich ihrer Lebens- und Nistweisen unterscheiden sie sich zum Teil stark voneinander und zeigen artspezifische Spezialisierungen auf.

Wildbienen kommen in sehr unterschiedlichen Lebensräumen vor, von trockenheißen Felshängen bis hin zu kühlen Hochmooren, wobei trockenwarme Gebiete bevorzugt besiedelt werden. Die meisten Wildbienenarten sind sehr wärmebedürftig, weshalb oftmals thermisch begünstigte Standorte wie z.B. Trockenrasen, Hochstaudenfluren sowie in Südexposition gelegene Steilwände und Abbruchkanten eine hohe Wildbienenartendiversität aufweisen (Westrich 2019).

Wildbienen sind in der Regel solitär lebend und legen ihre Brutzellen ohne die Hilfe von Artgenossen an. Lediglich einige Furchenbienen und Hummeln weichen von der solitären Lebensweise ab (Deutsche Wildtier Stiftung 2016). Bei der Nestplatzwahl haben sich unterschiedliche Niststrategien entwickelt: Der Großteil nistet endogäisch und legt Hohlräume unter- und/oder oberirdisch an, andere nutzen vorhandene ober- und/oder unterirdische Hohlräume, Spalten und Fugen. Zudem gibt es Arten, die in markhaltigen Pflanzenstängeln nisten, Freibauten an vertikalen Strukturen anlegen, leere Schneckenhäuser nutzen, Gänge in Totholz nagen oder bei ihrer Wirtsart parasitieren (Kuckucksbienen) (Westrich 2019).

Neben unterschiedlichen Niststrategien weisen viele Wildbienen artspezifische Blütenbesuche auf. Neben der Aufnahme von Nektar, der zum Großteil zur Eigenversorgung genutzt wird, sammeln Bienen Blütenpollen zur Verproviantierung ihrer Brutzellen. Bei 30 % der nestbauenden Wildbienenarten liegt hierbei eine Spezialisierung vor. Diese oligolektischen Arten benötigen den Pollen bestimmter Pflanzenfamilien, -gattungen und in einigen Fällen den Pollen ganz spezieller Pflanzenarten und ihr Vorkommen ist an das Vorhandensein der entsprechenden Pflanzen gekoppelt (Deutsche Wildtier Stiftung 2016). Polylektische Bienen hingegen weisen keine Bindung an bestimmte Pollenpflanzen auf, oftmals ist dennoch eine gewisse Bevorzugung zu erkennen (Westrich 2019).

Jede Bienenart benötigt unterschiedliche Requisiten in ihrer Umwelt, die gleichzeitig und innerhalb ihres individuellen Aktionsraums vorhanden sein müssen, damit die jeweilige Bienenart den Gesamtlebensraum, der sich bei dem Großteil der Arten aus mehreren Teillebensräumen zusammensetzt, besiedeln kann. Dabei ist die Größe eines Wildbienenhabitats von der Verzahnung bzw. Fragmentierung der einzelnen Teillebensräume abhängig. Da jedoch viele Wildbienenarten einen geringen Aktionsradius vorweisen aufgrund eingeschränkter Flugdistanzen, ist in den meisten Fällen ein engmaschiges Netz an diversen Teillebensräumen für das Überleben und Vorkommen einer Wildbienenart existenziell (Westrich 2019). Der artspezifische Aktionsradius wird durch die tolerierte Distanz zwischen den Teillebensräumen definiert und unterscheidet sich stark zwischen den Wildbienenarten: Die Mauerbiene *Osmia anthocopoides* legt während der Verproviantierungsphase z.B. lediglich eine Distanz von 20 Metern zurück, wohingegen die Sandbiene *Andrena vaga* ca. 600 Meter und die Furchenbiene *Halictus sexcinctus* bis zu 1300 Meter Flugstrecke bewältigen kann (Dathe & Saure 2000). Die Honigbiene *Apis mellifera* kann sogar bis zu 10 Kilometer Flugstrecke absolvieren (Westrich 2019). Artspezifische Angaben zu Flugdistanzen und Aktionsradien können allerdings nur für äußerst wenige Arten getroffen werden. Von den meisten Wildbienenarten sind genaue Aktionsradien bisher unbekannt, sie liegen i.d.R. bei wenigen hundert Metern bis maximal 1-1,5 Kilometern (Westrich 2019).

Eine mögliche Besiedlung von bestäubenden Insekten hängt allerdings nicht nur von der Bereitstellung geeigneter Nistplätze ab, der Wahl des richtigen Substrats und der artgerechten Ausgestaltung ab, darüber hinaus spielen für eine erfolgreiche Besiedlung auch diverse Umweltfaktoren eine entscheidende Rolle. Durch die Nähe zur Autobahn ist der potenzielle Nistraum andauerndem Lärm, Vibrationen und Schadstoffen ausgesetzt, deren Einfluss bisher nicht abschätzbar ist. Zudem besteht jederzeit die Gefahr der Tötung durch Kollision. Aus diesem Grund beziehen sich alle hier dargelegten Maßnahmen lediglich auf die autobahnabgewandte Lehmwandseite, um die Gefahrensituationen zu minimieren.

12.3.4. Ausstattungselemente der Lehmwand mit Naturschutz-Bauelementen

Eine Lärmschutzwand in Lehmbauweise ist nicht von vornherein ein idealer Lebensraum. Die dafür notwendigen Bauelemente aus Lehm, ob nun aus Stampflehm oder aus Wellerlehm, sind dicht, kompakt, trocken und im Grunde ebenso vorrangig die technischen Anforderungen an ein stand- und verkehrssicheres sowie hinsichtlich des Lärmschutzes funktionales Bauwerk an einer Autobahn erfüllen. Die Erfahrungen des Lehmbauhandwerks belegen, dass beim Stampflehm keine, beim Wellerlehm jedoch Besiedlung stattfindet. Es entstehen jedoch auch nach Jahrzehnten keine Durchbohrungen in Folge von Insektentätigkeit statt.

Die Qualität für eine den beschriebenen Lebensraum besiedelnde Tierart, wie sie die Gruppe der Wildbienen darstellt, muss durch bestimmte Maßnahmen und Bauelemente vorbereitet und hergestellt werden. Dabei kann unterschieden werden in Maßnahmen, die besiedelbare Hohlräume schaffen, die dann von verschiedenen Tierarten, auch von Wildbienen, angenommen werden können. Lehmbauten bieten mit entsprechenden Vorbereitungsmaßnahmen wie vorgefertigte Röhren und Hohlräume potenzielle Nistmöglichkeiten für zahlreiche gefährdete Wildbienenarten, aber auch andere Insektenarten. Bei einer Neuanlage einer Lehmmauer können diverse Requisiten mitgedacht und möglicherweise integriert werden, um einer möglichst diversen Anzahl an Tieren eine geeignete Nische bieten zu können. In großen Hohlkörpern könnten Felsformationen nachgebildet, Holzelemente und weitere Hohlräume wie z.B. Pflanzenstängel eingearbeitet werden. Auch die Dachkonstruktion bietet möglicherweise eine Integration von Requisiten an. Bauelemente können integriert werden, die vorgelocht sind bzw. Bohrungen aufweisen. Auf diese Weise wird ein breites Spektrum von Tierarten angesprochen, die nicht nur im Bauwerk selbst, sondern auch im näheren Umfeld die Biodiversität spürbar erhöhen.

Lehmbauten sind insbesondere dann ein hochwertiger Biotopbaustein, wenn das Bauwerk weiche Lehmelemente integriert, die eine Ansiedlung von Wildbienenarten erlauben, die sich selbst grabend Nester anlegen. Für diese besonders spezialisierten Tierarten, die auf eine grabfähige Konsistenz des Lehmmaterials angewiesen sind, werden die statisch tragenden Elemente der Lärmschutzwand durch geeignete Aussparungen ergänzt, die dann mit grabfähigem weichem

Lehm ausgefüllt und damit lebensraumfähig werden. Diese Bauweise bietet sich für die nach Westen weisende Oberfläche der Lehmlärmschutzwand an, die in den Mittags- bis Abendstunden der verstärkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Eine pflanzliche Besiedlung kann spontan oder gelenkt erfolgen, sollte auf Arten beschränkt werden, die auf die extrem trockenen und warmen Standortverhältnisse angewiesen sind, und die möglichst wenig Schattenwirkung erzeugen.

Wichtig ist aber auch, dass bei der Anlage von Lebensraumstrukturen auch das Nahrungsangebot mitgedacht werden muss. Aufgrund der oftmals sehr limitierten Flugstrecke wird im Aktionsradius der Wildbienen genügend Nahrung bzw. Pollen und Nektar benötigt. Ist dies nicht der Fall, muss über eine Ansaat oder Anpflanzung von bestäuberfreundlichen Pflanzen nachgedacht werden. Darüber hinaus muss die Tatsache, dass Störungen wie Lärm, Schadstoffbelastung und Vibration eine mögliche Ansiedlung erschweren oder auch verhindern können, in Betracht gezogen werden.

12.3.4.1. "Bienensteine"

Für den besiedlungsfeindlichen Stampflehm wurden Tonelemente entwickelt, die eine Besiedlung diverser Arten ermöglicht. Die Bienensteine wurden insbesondere für solitäre Wildbienenarten konzipiert, die vorhandene oberirdische Hohlräume für die Anlage ihrer Brutzellen nutzen. Um Arten unterschiedlichster Körpergröße geeignete Nistgänge anbieten zu können, wurden in vorgefertigte Tonelemente Hohlräume diverser Durchmesser (2-11 mm) integriert, die im Anschluss bei niedriger Temperatur gebrannt wurden. Beim Herstellungsprozess wurde darauf geachtet, dass keine Trocknungsrisse entstehen und der Ton offenporig und damit atmungsaktiv bleibt, um einer späteren Verpilzung der Brutzellen vorzubeugen (David 2020). Die an sog. "Insektenhotels" erinnernde Bienensteine werden in Schichten in die Lehmwand integriert und dienen neben ihrer Funktion als Nistraum auch als Abwitterungsschutz für die Stampflehmwand.

Entsprechend des Musters von Insektenhotels können partiell weitere Elemente in die Lehmwand integriert werden, z.B. Halme aus getrocknetem Stroh, markhaltige Pflanzenstängel, Tothholzelemente etc..

Auswahl hohlraumbesiedelnder solitärer Wildbienenarten

Die Gartenmaskenbiene *Hylaeus hyalinatus* ist weit verbreitet und sehr häufig. Sie nistet in diversen Hohlräumen z.B. in solchen von Sand-, Löss- und Lehmwänden, in Mauerritzen und -fugen, in verlassenen Bauten von Mörtel- und Seidenbienen sowie in alten Bauten der Grabwespe *Trypoxylon* in Lehmwänden. Gelegentlich wird sie auch nistend in dünnen Brombeerranken und altem Holz beobachtet. Die polylektische Art besucht u.a. Giersch, Wilde Möhre, Gewöhnliche Kratzdistel, Mutterkraut, Graukresse, Scharfen Mauerpfeffer, Wilde Resede, Brom- und Himbeere (Westrich 2019).

Anthidium oblongatum, die Spalten-Wollbiene gilt als mäßig häufig. Sie ist eine wärmeliebende solitäre Wildbiene, die ihren Siedlungsschwerpunkt in trockenwarmen Lebensräumen hat und in vorhandenen Hohlräumen unterschiedlichster Formen und Größen nistet: in Erdritzen, in Mauerfugen und Felsspalten sowie zwischen Geröll und aufeinanderliegenden Steinen. Die polylektische Spalten-Wollbiene weist keine Pollenspezialisierung auf, benötigt allerdings als Baumaterial für ihre Brutzellen abgeschabte Pflanzenhaare vom Ziest, Königskerze, Sand-Strohblume, Kugeldistel, Silberimmortelle oder Golddistel (Westrich 2019).

Megachile rotundata, die Luzerne-Blattschneiderbiene, gilt als weit verbreitet und mäßig häufig. Die polylektische Wildbienenart nistet in vorhandenen Hohlräumen, u.a. in Löss- und Lehmwänden und wird gelegentlich auch an Nisthilfen beobachtet. Nachgewiesene Blütenbesuche gibt es u.a. vom Kugel-Lauch, Feld-Mannstreu, Zwerg-Alant, Weidenblättrigen Ochsenauge, Weißen Steinklee, der Felsen-Fetthenne und der Luzerne (Westrich 2019).

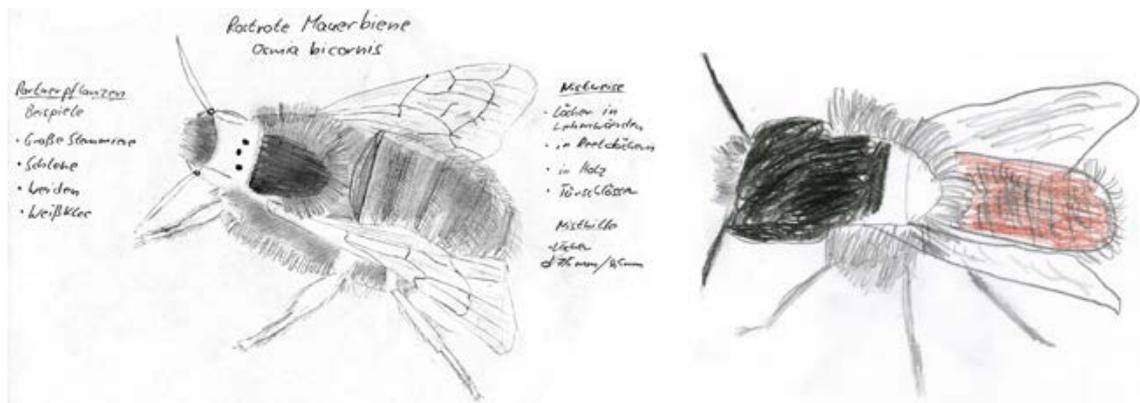


Abb. 79 Rostrote Mauerbiene (*Osmia bicornis*), zwei Zeichnungen von Schülern der Montessori-Schule Wittenberge

Die Rostrote Mauerbiene, *Osmia bicornis*, gilt als flächendeckend verbreitet und häufig. Die solitäre Art nistet in vorhandenen Hohlräumen verschiedenster Formen und Größen und weist hierbei eine hohe Flexibilität auf. Sie besiedelt sehr schnell Nisthilfen und gilt als ausgesprochen polylektisch. Gerne besucht sie u.a. Blüten der/des Stechpalme, Sockenblume, Hainbuche, Gewöhnlichen Natterkopfes, Gewöhnlichen Beinwells, Goldlacks und der Wilden Resede (Westrich 2019).

12.3.4.2. Einfügen von „Bienen/Vogellehm“

Neben den Bienensteinen wurde der „Bienenlehm“ entwickelt, der in großen Quadern in die Lehmwand integriert wird. Diese Lebensraumstruktur ist aus naturschutzfachlicher Sicht besonders wertvoll, da sie für spezialisierte Wildbienen konzipiert wird, die ihre Brutzellen selbstständig grabend in vertikales lehmiges Substrat bauen. Da solche Strukturen bevorzugt von Bienen der Gattung *Anthophora*, Pelzbienen, aufgesucht werden, spricht man bei künstlich angelegten Lehmwänden oftmals auch von „Pelzbienenwänden“ (Martin 2000). Allerdings besiedeln auch Bienenarten der Gattungen *Colletes*, *Hylaeus*, *Andrena*, *Halictus* und *Lasioglossum* Steilwände und Wespenarten wie die Gemeine Schornsteinwespe finden dort ihre geeignete Nische. In den Folgejahren werden die von selbstgrabenden Bienen angelegten Hohlräume von hohlraumbesiedelnden Arten (nach)genutzt (Wiesbauer 2009, Westrich 2019).

Im Gegensatz zur eigentlichen Lehmlärmschutzwand beinhaltet der ‚Bienenlehm‘ weder Steine noch Stroh, die eine Barriere für grabende Insekten darstellen. Beim Herstellungsprozess wird auf eine geeignete Härte des Substrats geachtet, die den selbstgrabenden Bienen ein Durchkommen ermöglicht, dennoch eine geeignete Stabilität aufweist. Auf die Beimengung von organischem Substrat wird verzichtet, da dies eine Verpilzung der Brutzellen begünstigt. Auch scharfkantiges Substrat wie Quarzsand wird als ungeeignet eingestuft, da es eine schnellere Abnutzung der Mandibeln, Mundwerkzeuge der Bienen, begünstigt (David 2020).



Abb. 80 Schornsteinwespe; Foto Christian Hansel

12.3.4.3. Lochungen in Wellerlehm

Auch im Wellerlehm können durch die Integration von Hohlräumen unterschiedlicher Durchmesser einigen Wildbienenarten geeignete Niststrukturen angeboten werden. Das in großen Mengen hinzugefügte Stroh behindert selbstgrabenden Arten eine Anlage der Brutzellen (Martin 2000). Es ist jedoch möglich, für Insekten Löcher in Wellerlehm zu bohren.

Die in Mai/Juni 2020 in Nebelin errichtete Probewand wurde am 28.07. überprüft. Einzelne Elemente des Lehmkörpers wiesen bereits identifizierbare Bauten von Insekten auf, ohne dass allerdings Aussagen zur jeweiligen Art getroffen werden können.



Abb. 81 Detailaufnahme vom 28. Juli 2020 des Wellerlehmteils der Probewand in Nebelin mit Insektenbauten. Foto Dieter Günnewig.

Beispiele grabender Wildbienenarten, für die mit Hilfe des Bienenlehms potenzieller Nistraum geschaffen wird

Die **Frühlings-Pelzbiene** *Anthophora plumipes* gilt als flächendeckend verbreitet und sehr häufig. Als Nistplatz dienen ihr Steilwände und Abbruchkanten, Trockenmauern und unverputzte Wände. Auch in künstlichen Nisthilfen wird die solitäre Wildbiene beobachtet, wenn das verwendete Substrat für sie geeignet ist. Sie gilt als ausgesprochen polylektisch und besucht u.a. Blüten von Sockenblumen, vom Gewöhnlichen Lungenkraut, von der Gewöhnlichen Ochsenzunge, vom Raps, Weiß-Klee, von der Gefleckten Taubnessel, vom Gamander-Ehrenpreis, Apfel, Birne, Rosskastanie und der Teppich-Primel (Westrich 2019).

Anthophora aestivalis, die Streifen-Pelzbiene, ist in Deutschland weit verbreitet, wird jedoch als selten eingestuft. Der polylektischen Art dienen fast ausschließlich Steilwände, Abbruchkanten, lehmverfugtes Gemäuer, vereinzelt auch schütter bewachsene ebene Flächen als Nistplatz. Bevorzugt besucht sie Blüten u..a. vom Gewöhnlichen Sonnenröschen, von der Futter-Esparsette, vom Rot-Klee, Gewöhnlichem-Wundklee, von der Weißen Taubnessel, Wiesen-Salbei und dem Kriechenden Günsel (Westrich 2019).

Die Buckel-Seidenbiene *Colletes daviesanus* gilt als weit verbreitet und häufig. Die Wildbienenart nistet u. A. in Sand-, Kies- und Lehmgruben in selbstgegrabenen Hohlräumen. Die oligolektische Art weist eine Pollenspezialisierung auf Asteraceen auf. Hauptsächlich sammelt die Art Pollen vom Rainfarn (Westrich 2019).

Colletes similis, die Rainfarn-Seidenbiene, gilt als weit verbreitet und mäßig häufig. Sie nistet in selbstgegrabenen Hohlräumen in der Erde, in Löss- und Steillwänden sowie Abbruchkanten. Die oligolektische Wildbienenart ist auf den Pollen von Asteraceen spezialisiert. Ihre Hauptpollenquelle stellt der Rainfarn dar (Westrich 2019).

12.3.4.3. Einfügen von weiterem Material (Schilfrohr)

Hypergäisch nistende Wildbienenarten nutzen diverse oberirdische Strukturen zur Anlage von Brutzellen. Dabei ist die Auswahl des geeigneten Lebens- und Nistraumes stark artspezifisch ausgeprägt (Westrich 2019).

Indem markhaltige Pflanzenstängel von z.B. Brombeere, Himbeere, Holunder etc., Totholzelemente und/oder Schilfrohr in die Lehmwand integriert werden, kann einem größeren Artenspektrum passender Nistraum angeboten werden.

12.3.4.4. Aussparungen für Fledermausarten (mit vorgesetzten sägerauen Lärchenbrettern)

Zusätzlich zum spezifischen Angebot des Baustoffs Lehm lassen sich weitere Strukturen in eine Lehmwand integrieren, die auch anderen Tierarten Wohnraum bzw. Unterschlupf bieten.

Auf Vorschlag des Biosphärenreservats haben wir uns auch dem Thema Fledermäuse gewidmet. Dieses ist direkt an der Autobahn eher nicht günstig, oder muss dann mit Überflughilfen gekoppelt sein. Wir schlagen auf Anraten der BAST einen Prototypenbau als Ummantelung/Schutz um die Raststätte herum vor. Diese schützt einerseits das Dorf vor Lärm, aber auch die Landschaft und Natur und erfüllt die Voraussetzung der Reduktion des Flächenverbrauchs. Hier macht es laut Auskunft des Fledermausexperten Herrn Andreas Hagenguth Sinn, Nistmöglichkeiten für Fledermäuse zu schaffen. Ein solcher sehr trockener Nistplatz an der Wand (Wellerbauprototyp, 4 m hoch Ummantelung Raststätte) kommt für die unten aufgelisteten, im Gebiet lebenden Arten in Frage und wäre für ein Pilotprojekt (mit Monitoring durch die Biosphäre) interessant.



Abb. 82 Zwergfledermaus; Zeichnung von Martin Ryll, Montessori-Schule Wittenberge

Die Wand muss lediglich einfache unter dem Dach befindliche Nischen im Lehm mit schrägem Boden (damit Kot rausfallen kann) aufweisen. Diese würde mit einem vorgesetzten sägerauem Lärchenbrett so versehen, dass ein Spalt von je nach Art verschiedener Größe zwischen 1,5 und 3, evtl. 4 cm offen bleibt.

Neben Vögeln können auch bedrohte Fledermausarten durch gezielte Maßnahmen an der Lehm-lärmschutzwand in ihrem Bestand gefördert werden. Nach Einschätzung des Experten Herr Ha-

geguth kann bei folgenden, im Untersuchungsraum bereits kartierten Fledermausarten, von einer potenziellen Besiedlung ausgegangen werden:

Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*): Die Art gilt als ungefährdet in Deutschland (Meinig et al. 2009).

Breitflügel-Fledermaus (*Eptesicus serotinus*): Eingestuft in Deutschland als Gefährdung unbekanntes Ausmaßes (Meinig et al. 2009) und in Brandenburg als gefährdet (Klawitter et al. 2005).

Mopsfledermaus (*Barbastella barbastellus*): Die Art ist aufgeführt im Anhang II der FFH-Richtlinie und gilt somit als Art von gemeinschaftlichem Interesse (Landesamt für Umwelt Brandenburg o.J.). In Deutschland ist sie als stark gefährdet (Meinig et al. 2009) und in Brandenburg als vom Aussterben bedroht eingestuft (Klawitter et al. 2005).

Graues Langohr (*Plecotus austriacus*): eingestuft als stark gefährdet in Deutschland (Meinig et al. 2009) und als stark gefährdet in Brandenburg (Klawitter et al. 2005).

Braunes Langohr (*Plecotus auritus*): Art der Vorwarnliste in Deutschland (Meinig et al. 2009) und in Brandenburg als gefährdet eingestuft (Klawitter et al. 2005).

Abendsegler (*Nyctalus noctula*): Art der Vorwarnliste in Deutschland (Meinig et al. 2009) und in Brandenburg als gefährdet eingestuft (Klawitter et al. 2005).

Allerdings ist bei einer potenziellen Ansiedlung jederzeit zu beachten, dass eine Integration von Nistkästen oder -strukturen in die Lehmlärmschutzwand nur an geeigneten Stellen der Mauer (geringste Kollisionsgefahr, wenig Lärm und Licht) in Betracht gezogen werden kann. Fledermäuse gelten in der Regel als lärmempfindlich und weisen aufgrund ihres Jagdverhaltens ein erhöhtes Kollisionspotenzial mit vorbeifahrenden Autos auf. Darüber hinaus gelten einige Arten als sehr lichtscheu (Landesnaturausschutzverband Baden-Württemberg e.V. 2007), weshalb auch die Störwirkung durch Lichtquellen auf bestimmte Fledermausarten mitgedacht werden muss. Inwiefern sich eine gezielte Förderung von Fledermäusen durch die Integration von Niststrukturen in die Lehmlärmschutzwand lohnt, muss noch abschließend geprüft und bewertet werden.

12.3.5. Die Lehmabwand bietet zudem das Potenzial, weitere Nistmöglichkeiten für andere Tiergruppen zu integrieren, um das Lebensraumangebot im Untersuchungsgebiet für bedeutende Tiergruppen zu erhöhen.

Nach Durchsicht der Anlage des Artenschutzbeitrags werden nachfolgend weitere im Untersuchungsraum vorkommende Tierarten betrachtet, denen mit Hilfe der Lehmabwand potenzielle Lebensraumstrukturen und/oder Requisiten angeboten werden können.

Rauchschwalben (*Hirundo rustica*) gelten als Kulturfolger und kommen daher überwiegend im ländlichen Raum vor, wo sie oftmals Ställe und Scheunen besiedeln. Bei der bekanntesten einheimischen Schwalbenart ist ein schleichender Bestandsrückgang zu verzeichnen aufgrund von zunehmendem Nahrungs- und Nistplatzverlust. Besonders negativ wirkt sich die Versiegelung der Landschaft, insbesondere von Feldwegen, auf den Bestand der Rauchschwalben aus, da die Art für die Nestanlage Lehmputzen benötigt (Nabu o.J.). Rauchschwalben könnten daher potenziell von der geplanten Lehmlärmschutzwand profitieren durch die Einbringung von Lehm in ihren Lebensraum. Darüber hinaus können durch die Anbringung von Nistkästen gefährdete oder im Bestand rückläufige Vogelarten wie der Star (*Sturnus vulgaris*) oder der Trauerschnäpper (*Ficedula hypoleuca*) gezielt gefördert und bereits bestehende Populationen gestärkt werden.

Der **Bienenfresser** (*Merops apiaster*) besiedelt vorzugsweise trockenwarme, halboffene und strukturreiche Landschaften und benötigt für eine Ansiedlung ein reiches Nahrungsangebot, insbesondere im Mai, sowie geeignete Brutplätze zur Höhlenanlage in Erdanrissen, Abbruchkanten oder Steilwänden von vorzugsweise zwei bis vier Meter Höhe und fünf bis fünfzig Meter Länge. Somit könnte die Art von der Anlage einer Lehmabwand profitieren, allerdings reagiert sie in der Phase der Balz und des Höhlengrabens sehr empfindlich auf Störungen und kommt derzeit noch nicht im Untersuchungsraum vor (Nabu Sachsen-Anhalt o.J.).

Literatur zu 12.3

- Dathe, H. H.; Saure, C. (2000).** *Rote Liste und Artenliste der Bienen des Landes Brandenburg (Hymenoptera: Apidae)* Hrsg. Landesumweltamt Brandenburg. -Natursch. u. Landschaftspfl. i. Brand. 9 (1): Beilage.
- Deutsche Wildtier Stiftung (2016).** *Wildbienen. Wichtige Bestäuber für eine Vielzahl an Pflanzen.* Online im Internet: <https://www.deutschewildtierstiftung.de/wildtiere/wildbienen>.
- Landesnaturausschutzverband Baden-Württemberg e.V. (2007).** *Fledermausarten und ihre Lichtempfindlichkeit.* Online im Internet: <https://lnv-bw.de/fledermausarten-und-ihre-lichtempfindlichkeit/>.
- Martin, H. J. (2000).** *Lehmwände für Pelzbienen & Co.* Online im Internet: <http://www.wildbienen.de/wbs-lwa0.htm>.
- Saure, C. (2005).** *Rote Liste und Gesamtartenliste der Bienen und Wespen (Hymenoptera part.) von Berlin mit Angaben zu den Ameisen.* In: DER LANDESBEAUFTRAGTE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE /SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (Hrsg.): Rote Listen der gefährdeten Pflanzen und Tiere von Berlin.
- Wiesbauer, H. (2009).** *Löss- und Lehmwände. Einige Bemerkungen aus naturschutzfachlicher Sicht. Berichte Geol. B.-A. 80.* Online im Internet: https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=BR0080_025_A.pdf.
- David, W. (2020).** *Fertig zum Einzug. Nisthilfen für Wildbienen. Leitfaden für Bau und Praxis – so gelingt's.* pala Verlag. 160 S.
- Klawitter, J., Altenkamp, R., Kallasch, C., Köhler, D., Krauß, M., Rosenau, S. & Teige, T. (2005).** *Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) von Berlin.* In: DER LANDESBEAUFTRAGTE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE / SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (Hrsg.): Rote Listen der gefährdeten Pflanzen und Tiere von Berlin. CD-ROM.
- Landesamt für Umwelt Brandenburg (o.J.).** *Arten des Anhang II der FFH-Richtlinie.* Online im Internet: <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.320158.de>
- Meinig, H., Boye, P. & Hutterer, R. (2009).** *Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) Deutschlands.* – In: Haupt, H., Ludwig, G., Gruttke, H., Binot-Hafke, M., Otto, C. & Pauly, A. (Bearb.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 1: Wirbeltiere. – Bonn (Bundesamt für Naturschutz). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (1): 115–153.
- Nabu (o.J.).** *Die Rauschschwalbe.* Online im Internet: <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/aktionen-und-projekte/vogel-des-jahres/1979-rauschschwalbe/index.html>
- Nabu Sachsen Anhalt (o.J.).** *Lebensraum. Manche mögen's heiß!* Online im Internet: <https://sachsen-anhalt.nabu.de/tiere-und-pflanzen/tiere/bienenfresser/lebensraum.html>
- Westrich, P. (2019).** *Die Wildbienen Deutschlands.* 2. Aktualisierte Auflage. Eugen Ulmer KG. Stuttgart. 824 S.
- Westrich, P.; Frommer, U.; Mandery, K.; Riemann, H.; Ruhnke, H.; Saure, C. & Voith, J. (2011).** *Rote Liste und Gesamtartenliste der Bienen (Hymenoptera: Apidae) Deutschlands.* – In: Binot-Hafke, M., Balzer, S., Becker, N., Gruttke, H., Haupt, H., Hofbauer, N., Ludwig, G., Matzke-Hajek, G. & Strauch, M. (Bearb.): Rote Liste der gefährdeten Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 3: Wirbellose Tiere (Teil 1). – Bonn (Bundesamt für Naturschutz). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (3): 373–416

12.4. Bewertung als Ausgleichsmaßnahme

Das beschriebene ökologische Potenzial eines vertikalen Bauwerks aus Lehm steht zunächst unabhängig neben der Fragestellung, ob eine Lärmschutzwand in Lehmbauweise als Bestandteil einer geplanten Autobahn im strengen Sinne der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung gemäß § 15 BNatSchG als Ausgleichsmaßnahme einsetzbar und anrechenbar sein kann. Dabei ginge es um die Frage, ob durch den Bau der Autobahn ein qualitativ vergleichbarer Verlust oder eine qualitativ vergleichbare Beeinträchtigung entstanden ist, der konkret ausgleichbar wäre durch die potenzielle Besiedlung durch Tier- und ggf. auch Pflanzenarten und ggf. weitere Vergleichsaspekte ökologischer Art.

Schallschutzwände in der alternativen Lehmbauweise sind sinnvolle und aufgrund ihrer ökologischen und visuellen Eigenschaften hervorzuhebende Bau- bzw. Gestaltungselemente einer Straßenplanung. Können derartige Maßnahmen, die in erster Linie dem Schallschutz benachbarter Wohngebäude dienen, gleichzeitig auch im Sinne der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung angerechnet werden, und wie könnte man ggf. eine solche Funktion befördern? Die Einbindung einer Lehmbau-Schallschutzwand in das Vorhaben ist in Bezug auf die Zugehörigkeit oder Interpretierbarkeit im Sinne der genannten Maßnahmen im FE-Vorhaben zu analysieren und zu beurteilen.

Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung kennt Vermeidungs-, Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen, letztere werden auch zusammengefasst zu Kompensationsmaßnahmen.

- Die Lärmschutzwand ist klassisch eine Vermeidungsmaßnahme in Bezug auf Schallauswirkungen bzw. Lärm. Die Auswirkungen des Schalls werden bezogen auf betroffene Aufenthaltsräume des Menschen und dort geltende Immissionsgrenzwerte reduziert. Eine ökologische aufgewertete Lehmbau-Lärmschutzwand bleibt zunächst eine solche vergleichbar effiziente Vermeidungsmaßnahme, allerdings mit einer naturschutzfachlich günstigeren, von der jeweiligen Bauweise abhängigen zusätzlichen Funktionalität.
- Die Vermeidungsmaßnahme könnte aber im vorliegenden Fall im Zusammenhang mit der möglichen Funktion als Leitstruktur für Fledermäuse – theoretisches Modell – auch im Kontext des Artenschutzes eine Rolle spielen, ggf. in den Kontext einer vorgezogenen ökologischen Ausgleichsmaßnahme einbezogen werden (CEF-Maßnahmen). Dieser Zusammenhang wäre zu prüfen.
- Ein Ausgleich ist dann anzunehmen, wenn durch das Bauvorhaben beseitigte oder stark beeinträchtigte Funktionen und Strukturen des örtlichen Naturhaushalts oder Landschaftsbildes in qualitativ vergleichbarer Weise wiederhergestellt werden. Eine solche Maßnahme dürfte die Lärmschutzwand nur unter besonderen, eher seltenen örtlichen Konstellationen sein.
- Eine Ersatzmaßnahme stellt beseitigte oder beeinträchtigte Funktionen und Strukturen in gleichwertiger Weise her oder gestaltet das Landschaftsbild landschaftsgerecht neu. Sie kann gewählt werden, wenn der konkrete Eingriff in vergleichbarer Weise nicht ausgeglichen werden kann. Hier bestehen zumindest Ansatzpunkte, Teilfunktionen der Lärmschutzwand anzurechnen. Auch hier kommt es auf die regionale Örtlichkeit an.

Gestaltungsmaßnahmen sind üblicherweise nicht Bestandteil der Eingriffsregelung. Sie dienen der Wiedereinbindung des technischen Bauwerks, z.B. Begrünung von Böschungen, aber auch sie können in der Eingriffsregelung z.B. im Zusammenhang mit dem Landschaftsbild zumindest partiell angerechnet werden. Man kann bei der Lärmschutzwand von einer ökologisch höherwertigen Gestaltungsmaßnahme reden. Der naturschutzrelevante Benefit, dass die Lehmwand Lebensraum schafft insbesondere für spezialisierte Insekten wie Wildbienen, ist dabei ebenso zu berücksichtigen wie die Annahme, dass eine entsprechende Wand im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen weniger technisch wirkt und von daher eine visuell positive Rolle spielen kann.

Darüber hinaus könnte der Aspekt eine Rolle spielen, dass eine Lehmlärmschutzwand, wie im Workshop entworfen, gestalterische Optionen hat, die eine bessere Integration in die umgebende Landschaft ermöglicht als die herkömmliche Lärmschutzwand. Die Farbigkeit durch das vor Ort gewonnene Material verbindet Landschaft und Bauwerk enger miteinander. Hierbei spielt eine

Rolle, dass es sich auf der Höhe der *Siedlung an der Bahn* um ein Landschaftsschutzgebiet handelt.

Die Anrechnung einer Lehmwand im Kontext der Eingriffsregelung erfordert den Sachverhalt, dass das ökologisch wertvolle „Angebot“ der Lärmschutzwand mit dem Verlust von Werten und Funktionen im betroffenen Gebiet einhergeht, wozu eben auch das Landschaftsbild gehört. Denkbar ist die vom Vorhaben initiierte Beseitigung oder Beeinträchtigung und Entwertung von natürlich (z.B. Abbruchkanten, Steilufer am Fluss) oder vom Menschen geschaffenen (vergleichbare Strukturen in Lehm- und Kiesgruben, Hohlwege) vergleichbaren Biotopen, deren Funktionen zumindest teilweise ersetzt werden könnten. Es ist anhand der Planunterlagen zu prüfen, ob das an der A14 im betroffenen Gebietskontext im Bereich zwischen Karstädt und Wittenberge der Fall ist.

Mit dem Vorhaben können aber auch Risiken verbunden sein, die zumindest angesprochen werden sollten. Die ökologische Funktion, dass ein neues Lebensraumangebot geschaffen wird, erfolgt in unmittelbarer Nachbarschaft einer Autobahn. Es ist zu erwarten, dass Insektenjäger wie Vögel und Fledermäuse angezogen werden. Aufgrund der unmittelbaren Nachbarschaft zu einer viel und schnell befahrenen Straße werden damit Risiken geschaffen, die bezogen auf die Eingriffsregelung als auch den Artenschutz Nachteile bedeuten können. Im Detail können sich daraus Vorschläge zur konkreten Ausgestaltung ergeben, z.B. die ökologische Optimierung auf die verkehrswegabgewandte Seite zu konzentrieren und die verkehrszugewandte Seite eher besiedlungsfeindlich zu gestalten.

Fazit

Derartige Maßnahmen, wenn sie insbesondere für die angeschlagene Insektenfauna nachweislich positive Effekte bringen können, sollten angesichts des zunehmenden Verlustes spezieller Biotope in der insgesamt intensiv genutzten (Agrar-) Landschaft unabhängig von den Anforderungen an die Eingriffsregelung im Straßenbau stärker zum Einsatz kommen. Das ist auch unter Aspekten wie Ressourcenschutz, Vermeidung von Energieverbrauch und anderen Umweltwirkungen durch den Transport zu prüfen, sowie inwieweit themenübergreifend eine positive ökologische Bilanz gezogen werden könnte.

12.5. Einbindung des Bauwerks in das Lebensraumnetzwerk der Umgebung (Autobahn A14 bei Nebelin)

Die Einbindung und Gestaltung der Rastanlage ist in den Planunterlagen zum Neubau der A14 mit den Maßnahmen 2 G und 27 A beschrieben. Für die Rastanlage selbst sind Grünflächen, Baum- und Strauchpflanzungen vorgesehen (2 G). Geschlossene Gehölzpflanzungen in einer Breite von 15 – 30 m und einem Flächenumfang von 4,8 ha (27 A) begrenzen die Rastanlage nach außen und schirmen sie ab, um visuelle Störungen des Landschaftsbildes sowie Gehölzverluste auszugleichen sowie die Einbindung des Rastplatzes in das Landschaftsbild zu gewährleisten. Das Maßnahmenblatt weist aus, dass mit der Maßnahme 27 A als Bestandteil des Maßnahmenkonzepts der Verlust von Wald, Feldgehölzen etc. im anteiligen Umfang von 1,65 ha sowie von versiegeltem Boden im anteiligen Umfang von 19,24 ha ausgeglichen wird. Die natürlichen Bodenfunktionen der ehemaligen Intensiväcker werden auf diese Weise extensiviert, durchwurzelt und damit aufgewertet. Die Struktur des Gehölzsaums ist durch Heckengehölze und einzeln Bäume (Überhälter) gekennzeichnet.

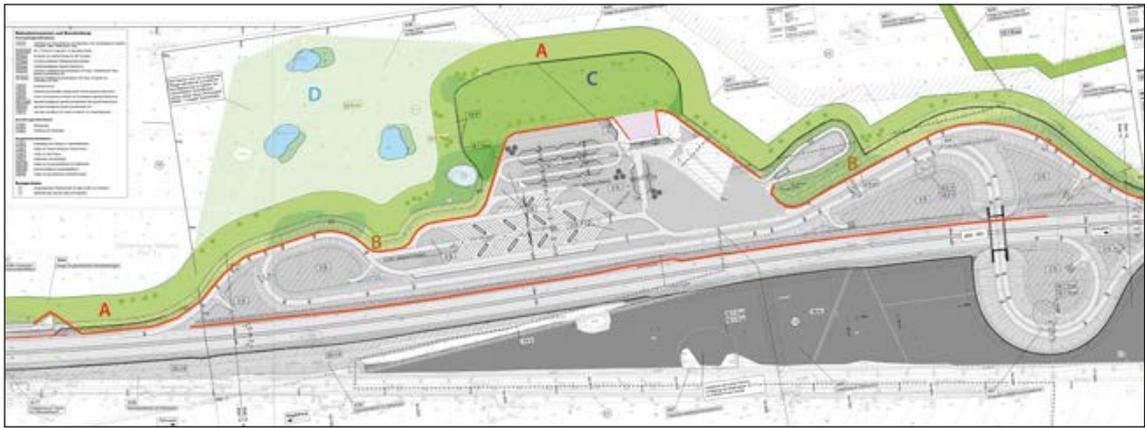


Abb. 84 Plan der Rastanlage bei Nebelin mit eingezeichnetem Verlauf des von uns konzipierten Lärmschutzes (rote Linien): zwischen Fahrbahn und Raststätte Stampflehm 5 m hoch; außen um die Raststätte Wellerlehm 4 m hoch.

Für den Naturschutz relevante Flächen:

A – vom Dorf aus zugängliche Bereiche

B – unzugängliche (sich z.B. durch die Geländesteigung selbst schützende) Bereiche

C – der von der Raststätte aus zugängliche Bereich

D – menschenfreier Bereich

Gleichzeitig bieten die verbleibenden Gehölzstrukturen weiterhin eine gewisse Leitfunktion für Fledermäuse an und ergänzen systemisch die weiter im Westen als Leitstrukturen vorgesehenen Baumhecken (Maßnahme 12.1 ACEF). Um diese Funktion zu ergänzen, wird vorgeschlagen, als Bestandteil des Pilotprojekts in Abschnitten der Lehmwand, die vorzugsweise in gewissem Abstand zu den Fahrstreifen liegen, Angebote für Quartiere und Wochenstuben für Fledermäuse in der Lehmwand anzulegen, die vorzugsweise von der verkehrsanlagenabgewandten Seite zugänglich sind (siehe Abb. 49 und Abb. 50 auf Seite 61).

Zu beachten ist, dass die Fledermäuse als höchst kollisionsempfindliche Artengruppe nicht verleitet werden, in den Verkehrsraum zu wechseln. Die Planunterlagen geben darüber keine Auskunft, aber die Beleuchtung der Rastanlage sollte mit insektenfreundlicher LED-Beleuchtung ausgestattet werden, um zu verhindern, dass Insekten angezogen werden, die wiederum die Fledermäuse zur Jagd anlocken.

12.5.1. Standorttypische Flora, Eignung als Futterpflanzen für Wildbienen, Entwicklungspotenzial

Eine modulare Bauweise der Lehmlärmschutzwand ermöglicht es, verschiedenen Insekten, darunter insbesondere Wildbienen, einen Lebensraum zu bieten, der ihren speziellen Anforderungen entspricht und in der ausgeräumten Kulturlandschaft selten geworden ist. Neben einem entsprechenden Angebot an Requisiten, wie z. B. Pflanzenstängeln, Holzelementen oder „Felsformationen“, die in der Lehmlärmschutzwand verbaut werden können, und weicherem, grabbarem Lehm innerhalb der Lehmlärmschutzwand ist entscheidend, dass den angesprochenen Arten auch genügend Futterpflanzen im nahen Umkreis zur Verfügung stehen.

Dabei sind verschiedene Faktoren zu beachten:

- Individuelle, artspezifische Flugstrecken der Bienen / Insekten für Futtersuche
- Artspezifische Unterschiede bezgl. Futterpflanzen - sollen polylektische und / oder oligolektische Arten angesprochen werden?
- Möglichst lange Blütezeit durch vielfältiges Angebot, da Flugzeiten je nach Art von ca. März bis Oktober variieren
- Standortvoraussetzungen bei Pflanzenauswahl beachten (heimische, standorttypische Pflanzen)

Es stellt sich also die Frage, ob im Umfeld der Lehmlärmschutzwand geeignete Standortbedingungen vorherrschen, die eine standorttypische Ansiedlung von Futterpflanzen für verschiedene Wildbienenarten ermöglichen.

Im Landschaftspflegerischen Begleitplan (LBP) zum Neubau der A14 finden sich Angaben aus einer Biotoptypenkartierung wieder, die im Zeitraum 2015/2016 durchgeführt wurde. Im Umfeld der zwischen Bau-Km 15+220 und Bau-Km 15+789 geplanten Lärmschutzwand liegen die Bezugsräume 10 „Strukturreiche Offenlandschaft nördlich von Nebelin“ und 11 „Ackergeprägte Offenlandschaft südlich von Karstädt“.

Der Bezugsraum 10 zeichnet sich durch einen höheren Grünlandanteil, zahlreiche gliedernde Gehölzstrukturen und die flachen, morphologisch wenig eingeschnittenen Niederungen (Premsliner Graben, Wassergrundgraben, Nebeliner Graben) aus. Überwiegend sind Geschiebemergel bzw. Geschiebelehme vorhanden, in den Niederungen ist der Anteil humoser Bodenschichten teilweise höher. Im Bezugsraum 11 überwiegt die ackerbauliche Nutzung. Zwischen Nebelin und Kaltenhof ist vorwiegend Geschiebemergel anzutreffen, während dieser südöstlich von Nebelin von Geschiebesanden überdeckt ist. Der Bezugsraum ist arm an Oberflächengewässern und das Grundwasser steht teilweise erst in mehr als 10 m Tiefe unter dem Geschiebemergel an. Aber auch hier sind die vielen Kleingewässer im nordöstlichen Raum von Nebelin charakteristisch für die Landschaft. Diese Kleingewässer können als potenzielle Insekentränken dienen.

Westlich der Bahntrasse befinden sich im relevanten Abschnitt sowohl Grünlandflächen (Frischweiden / Fettweiden) als auch Staudenfluren frischer, nährstoffreicher Standorte. Die Staudenfluren umfassen u. a. die Arten Rainfarn (*Tanacetum vulgare*), Echtes Johanniskraut (*Hypericum perforatum*), Schafgarbe (*Achillea millefolium*) oder Nickende Distel (*Carduus nutans*), die sich potenziell als Futterpflanzen für Wildbienen eignen⁵. Zwischen den Grünlandflächen und der geplanten Trasse der A14 liegen Ackerflächen (s. gelb eingefärbte Fläche in Abbildung 1). Etwas weiter nördlich (etwa Bau-Km 18+000) haben sich auf Grünlandbrachen weitere potenzielle Futterpflanzen für Insekten, wie Wiesen-Kümmel (*Carum carvi*), Weiß-Klee (*Trifolium repens*), Scharfer Hahnenfuß (*Ranunculus acris*) oder Breitwegerich (*Plantago major*) angesiedelt. Dies lässt erwarten, dass sich bei entsprechender Extensivierung der landwirtschaftlich genutzten Flächen bzw. bei Umwandlung der Ackerflächen zu Grünland oder anderen standortgerechten Biotoptypen ein geeignetes Artenspektrum ansiedelt bzw. ausgesät werden kann. Zudem kommen zahlreiche Gehölze, u. a. Korb-Weide (*Salix viminalis*), Zitterpappel (*Populus tremula*) oder Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa*), und Sträucher, wie z. B. Weißdorn (*Crataegus monogyna*), Schlehe (*Prunus spinosa*), Roter Hartriegel (*Cornus sanguinea*), Echte Felsenbirne (*Amelanchier ovalis*), Hundsrose (*Rosa canina*) oder Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*), vor, die sich ebenfalls als Futterpflanzen für Wildbienen und andere Insekten anbieten.

Östlich an ein Grundstück in der Siedlung an der Bahn angrenzend liegt eine Streuobstwiese, diese ist jedoch zu klein bzw. zählt zu wenig Obstbäume, als dass sie unter den gesetzlichen Schutz fallen würde. Streuobstwiesen sind grundsätzlich als ökologisch wertvolle Strukturen in der Landschaft anzusehen. Hier bietet es sich auf Grund der Nähe zur Lehmlärmschutzwand an, das Potenzial durch eine Erweiterung der Fläche bzw. des Baumbestandes und regelmäßigen Pflegemaßnahmen auszuschöpfen. Zudem können die Früchte im Rahmen von Umweltbildungsangeboten weiterverarbeitet und die Produkte (Saft, Apfelchips, Marmelade, etc.) regional vermarktet werden. In einem solchen Zusammenhang lassen sich auch gezielt heimische Beeresträucher wie z. B. Brombeeren, Johannisbeeren oder Stachelbeeren pflanzen, die einerseits den Insekten nützen und andererseits einen „benefit“ für die Anwohner darstellen.

Die Auswertung des LBP zeigt, dass grundsätzlich die Voraussetzungen für ein breites Angebot an Futterpflanzen für Wildbienen bestehen. Die aktuelle, intensive landwirtschaftliche Nutzung der Ackerflächen auf der Fläche der geplanten Raststätte geht in eine für diese Funktion ideale Wiesenlandschaft mit einzelnen Bäumen und Gebüschgruppen über. Dies könnte eine Anbindung darstellen, da hier viele Futterpflanzen bereits jetzt vorkommen.

5 Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (2012): Bienenweidekatalog · Verbesserung der Biene-weide und des Artenreichtums. Stuttgart. <http://www.wildbienen.de/wbs-pfpl.htm>

11. die Erhaltung und Wiederherstellung extensiv bewirtschafteter Dauergrünlandflächen, insbesondere Feucht- und Nasswiesen, möglichst mit winterlicher Überflutung, insbesondere in enger räumlicher Verzahnung mit Brache- und Röhrichflächen sowie Röhrichsäumen als charakteristische Elemente der Kulturlandschaft [...]

13. die Erhaltung und Wiederherstellung einer arten- und individuenreichen Fauna von Wirbellosen (insbesondere Großinsekten), Amphibien und weiteren Kleintieren als Nahrungsangebot sowie als Ausdruck eines leistungs- und funktionsfähigen Naturhaushaltes.“

Die Entwicklung, Erhaltung und Wiederherstellung von verschiedenen, für die Landschaft typischen Biotoptypen wie Nasswiesen, extensiv bewirtschafteten Dauergrünlandflächen oder auch Trockenrasen dient nicht nur der Förderung der Artenvielfalt, sondern auch der Erfüllung des Schutzzwecks des LSG.

Zusammengefasst scheint es möglich zu sein, ein standortgerechtes und dennoch breites Spektrum an Futterpflanzen für Wildbienen / Insekten im nahen Umfeld der Lehmlärmschutzwand zu etablieren. Allerdings ist es dafür notwendig, die intensiv genutzten Ackerflächen einer Umnutzung oder Extensivierung zu unterziehen und ggf. weitere notwendige Maßnahmen zu ergreifen, um die entsprechenden Biotoptypen zu entwickeln oder wiederherzustellen.

12.5.3. Anforderungen an stationäre Beleuchtungseinrichtungen

Künstliche Beleuchtung in der freien Landschaft kann für dämmerungs- und nachtaktive Insekten zu Beeinträchtigungen ihrer artspezifischen Lebensweisen mit zum Teil gravierenden Auswirkungen führen (v. a. Fallenwirkung, Auswirkungen auf Lebenszyklus, Fortpflanzung etc.). Neben den nachteiligen Wirkungen auf die Insekten selbst, kann eine attrahierende Wirkung auf Fledermäuse ausgelöst werden, die im Umfeld der Beleuchtungskörper die angelockten Insekten als Beute jagen und so im Verkehrsraum einem erhöhten Kollisionsrisiko mit Fahrzeugen ausgesetzt sein können.

Stationäre Beleuchtung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur für die PWC-Anlage vorgesehen. Für die übrigen Bereiche (siehe oben) gelten die nachfolgenden Anforderungen ebenfalls, sofern eine nachträgliche stationäre Beleuchtung vorgesehen sein sollte.

Zur Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen von Insekten, zur vorsorglichen Vermeidung von Risiken für Fledermäuse und zur allgemeinen Vermeidung von Störungen der nachtaktiven Fauna werden folgende Anforderungen bei der Konzeption und Ausführung der stationären Beleuchtung der PWC-Anlage berücksichtigt:

1. Die Beleuchtung der PWC-Anlage im Außenbereich wird auf das für den ordnungs- und sicherheitsgemäßen Betrieb erforderliche Maß nach Anzahl der Leuchtkörper, Höhe über Grund und Betriebsdauer begrenzt.
2. Alle im Außenbereich der PWC-Anlage installierten Leuchtstellen werden durch Ausrichtung, Abschirmung und Reflektoren so gewählt, dass der größtmögliche Anteil des Lichtstroms auf die zu beleuchtende Fläche fokussiert.
3. Die Lichtpunkthöhe wird möglichst niedrig über Grund gewählt.
4. Alle Leuchtgehäuse sind gegen das Eindringen von Spinnen und Insekten geschützt (Schutzart IP54, staub- und spritzwassergeschützt).
5. Es kommen Leuchtmittel mit einem geringen Spektralbereich und von mehr als 410 nm zum Einsatz wie z. B. Natriumdampf-Hochdrucklampen (570-630 nm), monochromatische „Gelblichtlampen“ mit engem Spektralbereich wie z.B. Natriumdampf-Niederdrucklampen (590 nm) sowie optional auch LED-Lampen vom Typ warm / neutral.

13. Nachhaltigkeit von Material und Bauweise

13.1. Bedeutung des Lehmbaus in der Region und europaweit



Abb. 86 Weltweites Vorkommen von Lehm, Karte: CRATerre/ENSAG

Lehm ist ein in Europa sehr häufiges, im Boden örtlich vorhandenes Material, das in Sand- und Kiesgruben, an Flussböschungen und Gewässerufeln, und in Bauprozessen anfällt. Es ist beliebig wiederverwendbar und gibt keine Schadstoffe ab. Es ist das einzige mineralische, unbegrenzt wiederverwendbare Material.

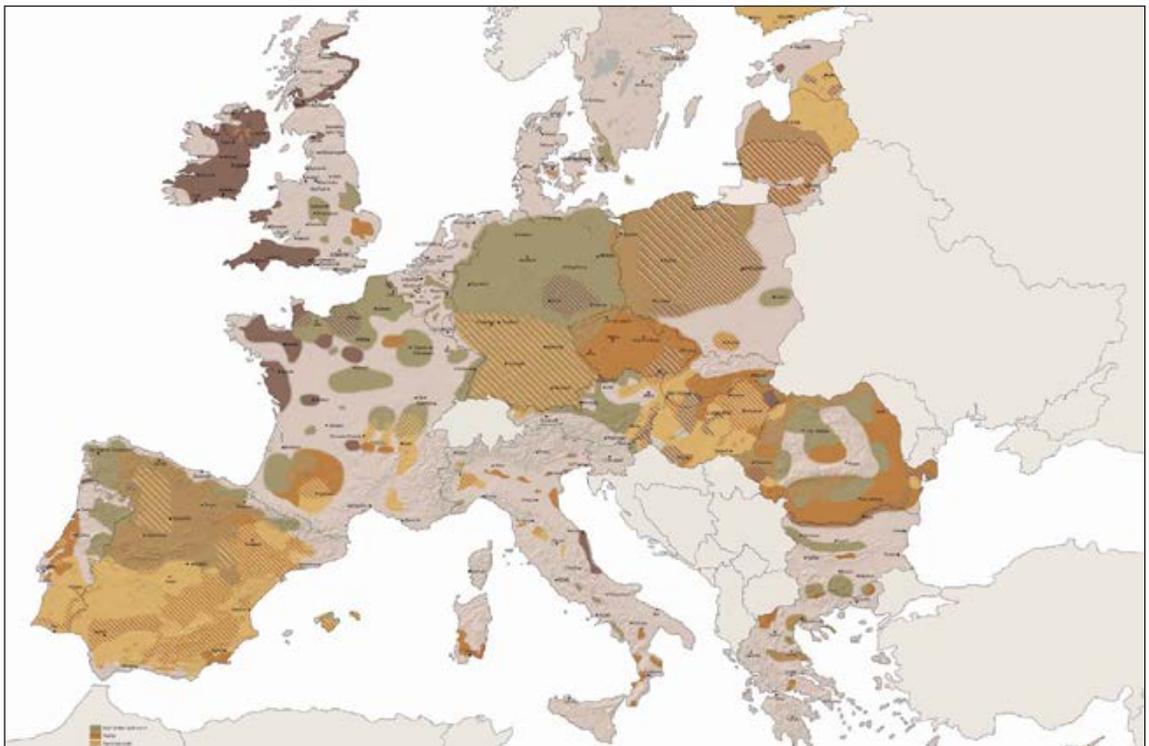


Abb. 87 Karte mit der historischen Verbreitung des Lehmbaus in Europa ("Map of Earthen Heritage in the European Union" (Ausschnitt); Autoren: Mariana Correia, Letizia Pasquale and Saverio Mecca. Auf der Karte sind vier Lehmbautechniken gekennzeichnet: Fachwerkbau mit Lehm, Lehmziegel, Stampflehm (auf der Karte gelblich markiert) und Wellerlehm (auf der Karte dunkelbraun markiert). Karte: Terra Incognita⁷

7 http://www.culture-terra-incognita.org/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=70&lang=en (Zugriff 30.09.2020)

Aufgrund seiner großen Verfügbarkeit im Boden sowie aufgrund seiner Modellierbarkeit und Klebkraft wird Lehm in Europa seit prähistorischen Zeiten als wichtiges Baumaterial genutzt⁸.

Bauten aus Wellerlehm (englisch: Cob), einer Mischung aus Lehm und Stroh, findet man in Deutschland und Frankreich, aber [...] auch in Großbritannien (Devon, Cornwall, Wales) [...].

Viele historische Stampflehmgebäude (französisch: Pisé) findet man heute noch in Frankreich, z. B. in der ländlichen Architektur um Grenoble und Lyon. Der wohl bekannteste und größte Stampflehmgebäude in Europa ist der mittelalterliche Burgkomplex der Alhambra in Spanien, der zur Gänze von einer massiven Stampflehmwand umgeben ist. Aber auch in Deutschland gibt es Stampflehmgebäude, wie ein 6-stöckiges Wohnhaus in Weil am Rhein beweist, welches um 1830 gebaut wurde und heute noch bewohnt ist. (Netzwerk Lehm / Geschichte des Lehmbaus⁹)

13.2. Lehmbau ohne Stabilisierung durch Zusätze

Im Zuge der Debatte zur Nachhaltigkeit von Baustoffen und der weltweiten Klimaveränderung steigt das Interesse an Stampflehmkonstruktionen. Zählt doch Stampflehm zur stabilsten und dauerhaftesten unter den Lehmbautechniken. Auch architektonisch und gestalterisch bietet der Stampflehm durch seine Schichtungen ein enormes Potential.

Eine weltweite Recherche ergibt eine Menge Stampflehm- oder Lehmziegelprojekte, die entweder mit Zement, Kalk, Bitumen oder anderen Chemikalien stabilisiert wurden. Betrachtet man die Rezepturen, dann beträgt der Anteil der nicht-natürlichen Zusätze bis zu 10%.

Allgemein werden im Lehmbau oft stärkere Wandstärken gewählt. Wird die Lehmmischung dann hochgerechnet, wird in einem Quadratmeter Wandfläche teils mehr Zement eingebaut als bei den meist gebräuchlichen Betonkonstruktionen.

Man könnte fragen, was denn so schlecht in der Verwendung von Zement als Stabilisierungsmittel sei. Einerseits wird das natürliche Material Lehm dadurch zu einem synthetisch aufbereiteten Material, das beim Rückbau nicht mehr als natürliches Material in den Kreislauf zurückkehren kann, sondern das als Bauschutt entsorgt werden muss.

Ein anderes Problem ist, dass Zement inflationär verwendet wird. Durch den Bauboom, vor allem in China, hat sich die Weltzementproduktion in den letzten 30 Jahren vervierfacht. Wird Zement, bzw. Beton weiterhin so flächendeckend wie bisher verwendet, auch bei vielen Bauvorhaben bei denen andere Bauweisen sinnvoller erschienen, werden die ambitionierten Klimaziele kaum zu erreichen sein.

Die Gründe für den Einsatz von Fremdstabilisierung von Lehm sind vielschichtig. Einerseits hat man mit der Fremdstabilisierung begonnen, als die Frage der Nachhaltigkeit noch kein Thema war. Zudem wurde die Erhöhung der Festigkeit durch die Beigabe von Stabilisierungsmittel als Modernisierung der traditionellen Lehmbauweisen aufgefasst, quasi als Anpassung an die moderne Zeit. Allmählich wird jedoch begonnen, die Stabilisierung zu hinterfragen. Im Grunde sind Bauweisen unter Verwendung von Beimischungen von nicht-natürlichen Zusätzen zum Lehm ein Etikettenschwindel und dürften nicht als Lehmbau bezeichnet werden.

Seit 1982 hat Martin Rauch zunächst in Eigenleistung, später mit den Unternehmen Lehm Ton Erde Baukunst GmbH und ERDEN Lehmbau GmbH, weit über mehrere hundert Stampflehmprojekte auf internationaler Ebene realisiert – und zwar ausschließlich ohne Fremdstabilisierung. Seit 20 Jahren liegt der Fokus in der Vorfertigung von unstabilisierten Stampflehmfertigteilen die auf der jeweiligen Baustelle zusammengefügt werden. Bei Großprojekten war es natürlich wichtig, das lokal verfügbare Erdmaterial zu verwenden, um die schweren Materialtransporte weitgehend zu minimieren. Um dies zu erreichen, wurden bereits vier temporäre Feldfabriken zur Herstellung von Stampflehmelementen an verschiedenen Standorten installiert: 2007-2012 in Sulz, Öster-

8 Cf. *3400 Jahre altes Passivhaus – Historischer Lehmbau in Europa & anderswo*, TU Wien 2019

9 <http://netzwerklehm.at/lehm/geschichte/> (Zugriff am 30.09.2020)

reich; 2012-2014 in Zwingen bei Basel, Schweiz; 2014-2015 in Dahram, Saudi Arabien; 2015-2017 in Darmstadt, Deutschland.

Die Innovation liegt in der Neuentwicklung industrieller Verfahrenstechniken und nicht in der Veränderung der Materialmischungen. Auch neue Technologien der Montage und Lehmbaustellen kennzeichnen diese Entwicklung.

13.3. Nutzung örtlicher Lehmvorkommen aus dem Autobahnbau

Bestandteil der Konzeption Lehmlärmschutzwand ist es, die Materialien für den Lehmbau nach Möglichkeit aus regionalen Vorkommen zu erschließen und daraus eine Marke zu generieren, z.B. „Prignitzer Lehm-lärmschutzwand“. Damit kommt auch zum Ausdruck, dass der Einsatz der örtlichen Lehmvorkommen tradierter Bestandteil im Häuser- bzw. Gebäudebau der Region ist. Gleichzeitig wird damit erreicht, Kosten und Ressourcen für den Transport zu minimieren.

Der Erläuterungsbericht (Unterlage 1) des Feststellungsentwurf enthält in diesem Zusammenhang eine interessante Passage, auf die das Realisierungskonzept der Lehm-lärmschutzwand aufsetzt.

Zitat S. 101f: „Ab ca. Bau-km 11+000 folgt ein Übergangsbereich zu den sich im Norden anschließenden saalekaltzeitlichen Hochflächen, die durch mächtige saalekaltzeitliche Hochflächensande über älteren Geschiebemergeln¹⁰ charakterisiert ist. Ab rd. Bau-km 12+000 bis rd. Bau-km 17+000 verläuft die Strecke im Bereich einer saalekaltzeitlichen Grundmoräne aus geringmächtigen Hochflächensanden über Geschiebelehm/-mergel, die teilweise durch sandige Erosionsrinnen mit organischen Einlagerungen aufgegliedert wird.“

Es besteht somit aufgrund der naturräumlichen Bedingungen die günstige Situation, dass mit den Arbeiten zur Trassierung der Autobahn unter Inkaufnahme überschaubarer Massenverluste der Bedarf von nach ersten Berechnungen ca. 10 t Geschiebelehm pro laufendem Meter Schwerlastwand unmittelbar vor Ort gewonnen werden kann. Für die gesetzlich vorgeschriebene Wand würde das bei einer Schwerlastwand 5.000 t, bei der für uns für diesen Teil vorgesehenen, schlanken Variante 1.700 t betragen. Überschaubar deshalb, weil die Planunterlagen davon ausgehen, dass ca. 2.350.000 m³ Boden angeliefert und eingebaut werden müssen, die erforderlichen Mehrmengen sind also vergleichsweise gering. Im unmittelbaren Nahbereich der Baustelle kann z.B. in einer von der örtlichen Landwirtschaft zur Verfügung gestellten Stallung das Material aufbereitet, gelagert, getrocknet, verarbeitet dann zur Baustelle transportiert werden. Die Überlegung ist zu konkretisieren, die in der unmittelbaren Nachbarschaft gelegene Tank- und Rastanlage vorübergehend für eine in Zeltbauweise errichtete Feldfabrikation zu nutzen und anschließend die fertigen Bauteile über die Autobahntrasse zur Baustelle zu verfrachten. Alternativ ließen sich die momentan leerstehenden Gebäude der Agrargenossenschaft in unmittelbarer Nähe zur Baustelle dafür nutzen.

Sollte diese Möglichkeit nicht realisierbar sein, besteht alternativ die Möglichkeit, beim ortsansässigen Kiesbauunternehmen baufähigen Lehm abzunehmen, der dort regelmäßig bei der Kieswäsche anfällt.

13.3.1. Erhalt von Bodenfunktionen bei ausgebautem Bodenmaterial

Text: Dr. Birgit Kocher, Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft

Die oberflächennahen Bereiche natürlicher Böden sind besonders wertvoll. Sie sind in tausenden von Jahren durch den intensiven Kontakt mit Luft, Sonnenstrahlung und Regenwasser, durch die dichte Besiedlung mit Mikroorganismen und durch die Wurzeln und Biomasse vieler Pflanzengenerationen entstanden. Vor allem in den oberen Dezimetern bis zu etwa einem Meter Tiefe sind die natürlichen Funktionen der Böden am vielfältigsten und Eigenschaften wie Wasser- und Nährstoffspeicherung oder Filter- und Puffervermögen am stärksten ausgeprägt. Vor allem mit

¹⁰ Geschiebemergel: unterschiedlich fetter (höherer Tonanteil) oder magerer (höherer Sandanteil) Lehm

diesem Bereich leisten Böden einen unentbehrlichen Beitrag zum Naturhaushalt, aber auch für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung. Bei Baumaßnahmen genießt dieser Bereich als „Mutterboden“ über den § 202 des Baugesetzbuches schon sehr lange einem besonderen Schutz: „Mutterboden, der bei der Errichtung und Änderung baulicher Anlagen sowie bei wesentlichen anderen Veränderungen der Erdoberfläche ausgehoben wird, ist in nutzbarem Zustand zu erhalten und vor Vernichtung oder Vergeudung zu schützen.“

Lehmbauwerke werden aus Boden hergestellt, und werden nach ihrer Lebensdauer wieder zu Boden. Auch wenn der verwendete Lehm nicht Mutterboden im eben beschriebenen Sinn ist, so hat er doch das Potential dazu.

Dieses Potential soll als Anlass genommen werden, im Rahmen dieses Projektes die hohe Bedeutung der Böden und die lebenswichtigen Funktionen, die sie erfüllen, besser sichtbar zu machen. In diesem Projekt soll deshalb im Zusammenwirken mit den örtlichen Landwirten besonderes Augenmerk auf die Erhaltung der Bodenfunktionen bei allen ausgehobenen und umgelagerten Böden gelegt werden und das im Gesamtkonzept der Raststätte auch nach der Fertigstellung kommuniziert werden.

Eine denkbare Möglichkeit dazu wäre die Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen (z.B. Speichervermögen für Wasser und Nährstoffe, Bodenstruktur) auf geeigneten umliegenden landwirtschaftlichen Flächen durch Nutzung der Böden, die im Zug der Baumaßnahme abgehoben werden müssen. Hier ist insbesondere Mutterboden von Bedeutung, aber auch Material aus dem Untergrund kann in Frage kommen.

13.3.2. Boden als Ressource sichtbar machen

Text von Dr. Birgit Kocher, Bundesanstalt für Straßenwesen

„Boden“ umfasst nach der Begriffsbestimmung im Bodenschutzgesetz nicht nur das, was man sich vorstellt, wenn man an Acker-, Wald- oder Gartenböden denkt, sondern auch die Gesteine im Untergrund. Das sind weitgehend unverwitterte Locker- und Festgesteine wie Sand, Kies und Fels, aber auch Produkte aus jahrtausendelanger Verwitterung von Gesteinen oder fossile organische Böden wie Torf oder Braunkohle.

Eines der wichtigsten dieser Verwitterungsprodukte ist Lehm – eine Mischung aus verschiedenen Korngrößen, die so viel Feinpartikel und Ton enthält, dass die Lücken zwischen den größeren Körnern ausgefüllt sind, und im feuchten Zustand alles ziemlich gut zusammenhaftet.

Bis sich aus einem Gestein durch die bodenbildenden Prozesse ein Boden gebildet hat, der als Wald-, Grünland- oder Ackerboden komplexe Ökosysteme tragen und zur Ernährung der Menschheit beitragen kann, vergehen in unserem Klima tausende von Jahren. Dabei sind bestimmte bodenbildende Prozesse so komplex, dass sie auch heute nur grob verstanden sind. Es entstehen aus den verschiedenen Ausgangsgesteinen durch die Wirkung unterschiedlicher Klimate und unterschiedlichen Reliefs, durch eine Vielzahl von Lebewesen wie Pilzen, Bodenbakterien und anderen Mikroorganismen bis hin zu bodenbewohnenden Säugtieren, sehr viele unterschiedliche Böden. Je älter sie werden, desto stärker unterscheiden sie sich von ihrem Ausgangsmaterial.

Durch physikalische und chemische Prozesse in Verbindung mit der Aktivität der Mikroorganismen entsteht eine „oberste Schicht der Erdkruste“, die erst „höheres“ Leben auf dem Festland ermöglicht. Die Böden, die sich dabei bilden, weisen oft Farb- und Strukturmerkmale auf, die Fachleuten, aber auch Landwirten schon beim Anschauen, Anfassen und Riechen zeigen, welche bodenbildenden Prozesse an diesem Standort abgelaufen sind, welche noch aktiv sind, und welche Bodeneigenschaften sie hier erwarten können. Da die Änderungen der Farben durch chemische Prozesse (Neubildung und Umbildung von Mineralen und organischer (Humus-) Substanz) ausgelöst werden, die eng mit dem Versickern von Niederschlagswasser in Verbindung stehen, bilden sich meist horizontale Farb- und Materialdifferenzierungen aus.

Diese sogenannten Bodenhorizonte sind aber nicht nur Zeiger für die Bodenentwicklung, sondern haben auch einen hohen ästhetischen Reiz. Ihre Indikatorfunktion und ein Teil ihrer Leistungen für die Ökosysteme werden durch Eingriffe und Umlagerung des Bodens verändert oder sogar zerstört. Trotzdem können auch Böden, die durch natürliche Prozesse (z.B. Erosion, Hochwässer) oder menschliche Eingriffe umgelagert wurden, wieder selbst Ausgangsmaterial der Bodenbildung werden. Je höher dabei der Anteil an feinverwittertem Material ist, und je weniger die umgelagerten Bodenschichten physikalisch (z.B. durch starke Verdichtung, Zerstörung der Aggregatstruktur) und chemisch (z.B. durch Zugabe von Zement oder Erhitzen) verändert werden, desto schneller können wieder viele oder alle der natürlichen Bodenfunktionen erfüllt werden.

Das heißt, auch umgelagertes Bodenmaterial kann - entsprechend seiner spezifischen Eigenschaften - Bodenfunktionen erfüllen und wieder zu Boden werden. Das Material einer baulichen Struktur aus Lehm kann nach ihrem Rückbau wieder in den Boden integriert werden - oder als „Bodenwand“ auch in Zerfallsstadien wichtige ökologische Funktionen für spezialisierte Organismen behalten.

Nach verbreiteter Ansicht im Abfallrecht ist dagegen Boden, der bei Bauvorhaben ausgehoben und nicht am Herkunftsort wiederverwendet wird, Abfall.

Eine Lärmschutzwand aus Lehm kann sichtbar machen, dass Böden belebt sind. Böden sind die natürlichen Bioreaktoren, in denen tote organische Substanz durch Pilze, Bodenbakterien und unzählige Kleintiere wieder in Nährstoffe umgewandelt und den Pflanzen zur Verfügung gestellt wird.

Auch wenn ein Teil dieser Funktionen während der Nutzungsdauer von Lehm als Teil eines Bauwerkes nicht aktiv ist, bleibt doch das Potential dafür erhalten. Die feinstverteilten Tonminerale und andere Produkte der jahrtausendelangen Verwitterung, die wesentlicher Bestandteil von Lehm sind, werden durch die Trocknung und den Lehmbauprozess nur „stillgelegt“, ebenso wie Dauerstadien der bodenbewohnenden Mikroorganismen. Wenn die Lehmwand rückgebaut wird oder selbst wieder durch Verwitterung zerfällt, treten die wertvollen Eigenschaften dieser Bodenbestandteile wieder voll in Funktion.

Nach der Renaissance des Holzbaus könnte Lehmbau ein weiterer Baustein für ressourcenschonendes Bauen werden, das auch energiearmes Recycling ermöglicht und damit zu einer Kreislaufwirtschaft ohne „downcycling“ beiträgt. Eine Lärmschutzwand aus Lehm kann Boden als Baumaterial wieder sichtbar machen - aber auch Böden als wichtige Naturressource ins Blickfeld rücken.¹¹

11 Begriffsbestimmung für Boden nach dem Bundesbodenschutzgesetz:

- (1) Boden im Sinne dieses Gesetzes ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der in Absatz 2 genannten Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten.
- (2) Der Boden erfüllt im Sinne dieses Gesetzes
 1. natürliche Funktionen als
 - a) Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,
 - b) Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,
 - c) Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers,
 2. Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte sowie
 3. Nutzungsfunktionen als
 - a) Rohstofflagerstätte,
 - b) Fläche für Siedlung und Erholung,
 - c) Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung,
 - d) Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung.

Teil IV: Ökonomische Betrachtung

Ökonomische Bilanz – Baukosten – Ökobilanzierung – Datenbanken – Wartungskosten – Marktanalyse

Im Bau verursacht die Lehmbauweise im Vergleich zu herkömmlichen Lärmschutzwänden höhere Kosten. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer und Folgekosten jedoch fällt die ökonomische Bilanz der vorgeschlagenen Lehmbauweisen jedoch vergleichbar oder – im Fall der maschinellen Wellerlehm-Bautechnik – günstiger aus. Das ist im Wesentlichen auf die sehr geringfügige Erhaltungs- und Wartungskosten, sowie geringe Rückbau- und Entsorgungskosten zurückzuführen. Dabei ist die besondere Langlebigkeit von Lehmbauten noch gar nicht berücksichtigt.

Die akustischen Eigenschaften der Lehmlärmschutzwand werden sich im Laufe kalkulierter Erosionsprozesse verbessern. Dies betrifft die Schallreflexion (Streuung). Der Hauptrohstoff einer Lärmschutzwand aus Lehm lässt sich ohne aufwändige Aufbereitung – und damit kostengünstig – theoretisch unendlich oft recyceln. Die Wellerlehm-Variante weist in einer vergleichenden Ökobilanzierung nach DIN EN 15804 (Lebenszyklusanalyse) die vergleichsweise niedrigsten Werte von Tonnen CO₂ auf, obwohl herkömmliche Ausführungen für Lärmschutzwände derzeit durch die Datenlage bevorzugt werden. Hier schlagen wir dennoch weitere Untersuchungen vor, da die langfristigen Vorteile der Lehmbauweise durch die vorliegenden Daten (BSSR 2020: OBD_2020_II) und die angewandten Richtlinien nicht in Gänze berücksichtigt werden können.

Neben den vorliegenden Kostenschätzungen ist auch die allgemeine Einschätzung des ökonomischen Potentials der vorgeschlagenen Baumaßnahme von Relevanz. Durch die für Stampflehm bereits existierende und das von uns derzeit entwickelte großtechnische Bauverfahren für Wellerlehm kann hier ein regionaler, ökonomischer Entwicklungsimpuls gesetzt werden, der zu einem nachhaltigkeitsbezogenen, ökonomischen Aufbruch verhilft. Entscheidend ist dabei, dass für den Bau des Lärmschutzes aus Lehm lokale und regionale Unternehmen gegenüber etablierten Unternehmen, die herkömmliche Lösungen von anderswo ‚importieren‘, mithalten können und sogar unter strikt ökonomischen Kriterien möglicherweise einen Vorteil haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Lehmbau wegen des nachhaltigen, lokal verfügbaren Haupt-Baustoffs sich als zukunftsweisend, den nationalen, europäischen sowie globalen Zielen entsprechend darstellt und sich im Vergleich mit herkömmlichen Bauverfahren für Lärmschutzwände insbesondere in langfristiger Betrachtung ökonomisch vorteilhaft zeigt, auch wenn initial mit einer Mehrinvestition zu rechnen ist.

14. Ökonomische Bilanz

Bisher sind in den Unterlagen zur Planfeststellung keine Festlegungen zur technischen Bauweise zu erkennen; eine übliche, kostengünstige Bauweise erfolgt in Form von Aluminium-Paneelen (Sandwich-Paneele) und dürfte der Kostenberechnung von rd. 1,45 Mio. € für den gesetzlich vorgeschriebenen Lärmschutzabschnitt auf Höhe der Nebeliner Siedlung an der Bahn zu Grunde liegen. Die Lehmbauweise fällt teurer aus (siehe Kostenschätzungen Seite 117 ff.). Die Lebensdauer der Wände und die Erhaltungskosten müssen jedoch auch berücksichtigt werden. Die einkalkulierte Erosion bewirkt, dass sich die akustischen Eigenschaften (speziell die Schallabsorption) im Abwitterungsprozess verbessern. Wartung der Wand selbst ist nicht erforderlich.

Die in der Projektplanung A14 ermittelten Investitionskosten müssten in diesem Falle angepasst werden. Dies kann nach Planfeststellung im Rahmen der Ausführung berücksichtigt werden, wenn die alternative Bauweise ausreichend begründet und politisch gewollt ist.

14.1. Allgemeine Einschätzung

Momentan arbeitet eine Studentin der TH Lübeck im Rahmen ihrer Abschlussarbeit an einer generellen Bilanz der ökonomischen Relevanz des Vorhabens „Naturschutz hochklappen“ (siehe 13.5). Über eine vergleichende Markt- und Standortanalyse soll ein präziserer Eindruck der langfristigen wirtschaftlichen Möglichkeiten erlangt werden.

Dabei hat die zu entwickelnde und abzuleitende Verfahrenstechnik einen nicht unerheblichen Einfluss: Die erforderlichen Geräte und Maschinen müssen den Markterfordernissen angepasst werden. Dies betrifft vor allem ein nachhaltiges „Scaling“, was nichts weniger bedeutet als möglichst mehrfach einsetzbare und dennoch für jeden Zweck leistungsfähige Komponenten bereitzustellen.

Was sich jedoch nun schon, auch ohne belastbare Zahlen feststellen lässt, ist, dass das regionale Potential an Menschen, fachlichen Ressourcen und Motivation vorhanden ist. Der Einsatz flexibler, umweltfreundlicher Verfahren unter Verwendung nachwachsender bzw. ohne großen Energieaufwand recycelbarer Ressourcen beginnt sich auch in anderen Wirtschaftsbereichen durchzusetzen.

Das Zustandekommen des Projektes bietet Chancen, der ganzen Region exemplarisch für andere zu einem nachhaltigkeitsbezogenen, regional wirksamen ökonomischen Aufbruch zu verhelfen. Ein neues Arbeitsfeld, welches die Tradition der Prignitz „in die Zukunft denkt“, kann entwickelt werden. Eine direkte Übertragbarkeit der für die Schallschutzwand entwickelten Verfahren ist möglich, wenn das erlangte Wissen in der Region effektiv genutzt, entwickelt und eine entsprechende Infrastruktur eingerichtet wird. Wir sehen unseren Vorschlag als nicht unerheblichen Trittstein auf diesem Weg.

14.2. Baukosten

14.2.1. Stampflehm-Trägerwand

Nachfolgend die geschätzte Kostenkalkulation für die von uns für den Bauabschnitt B vorgeschlagene Stampflehm-Trägerwand. Sie umfasst 570 m Breite und 7 m Höhe bei 45 cm Wandstärke. Für Informationen zur baulichen Ausführung siehe auch Abb. 3 auf Seite 22.

| Kostenschätzung Stampflehmwand mit Stahlrammrohrgründung – Bauabschnitt B, Bahnsiedlung | | |
|--|--|---|
| Stampflehm-Trägerwand (Bauabschnitt B) | | |
| Maße in Metern (B x H x T) 570 x 7 x 0,45 | Wandfläche Volumen Gewicht | 3315 m ² 1492 m ³ 4090 to Lehmmasse |
| | Euro exkl. USt. | €/m ² |
| Produktion der Lehmelemente in einer nahegelegenen Feldfabrik | 1.164.823 € | 351 € |
| Lohnkosten | 298.046 € | 90 € |
| Materialien | 590.583 € | 178 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 276.194 € | 83 € |
| Versetzen der Lehmelemente in bauseits gesetzte Fundamente und Stahlträger | 707.900 € | 214 € |
| Lohnkosten | 243.778 € | 74 € |
| Materialien | 235.348 € | 71 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 162.975 € | 49 € |
| Transport der Elemente | 65.799 € | 20 € |
| Lieferung und Montage der Abdeckung | 53.521 € | 16 € |
| Material | 29.804 € | 9 € |
| Montage | 23.717 € | 7 € |
| Gesamtkosten Produktion + Versetzen inkl. Abdeckung | 1.926.244 € | 581 € |
| Geschätzte Organisations- und Planungskosten | 229.272 € | 69 € |
| Fachplanung + Organisation | 98.410 € | 30 € |
| Werkplanung | 90.862 € | 27 € |
| Genehmigung Zustimmung im Einzelfall | 40.000 € | 12 € |
| Projektkosten ohne Fundamente | 2.155.516 € | 650 € |
| Kostenschätzung Fundament | | |
| Kostenkennwerte | Einheitspreis | |
| Bohrpfahl inkl. Pfahlkopf, d60cm | 200 Euro /m + 95 Euro / Stütze | |
| Fundament 40x130cm, C25/30 | 370 Euro/m ³ | |
| Stahlträger HEB 300 | 3,20 Euro/kg (inkl. Montage und Verguss) | |
| Hinweis: die Kostenkennwerte beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Hochbau | | |

Tabelle 9 Kostenschätzung Bauabschnitt B; Kostenschätzung Stand September 2020

14.2.2. Stampflehm-Schwerlastwand

Nachfolgend die geschätzte Kostenkalkulation für die von uns für den Bauabschnitt C vorgeschlagene Stampflehm-Schwerlastwand. Sie umfasst ca. 1.300 m Länge, 5 m Höhe und besitzt eine Wandstärke von ca. 1 m. Für Informationen zur baulichen Ausführung siehe Abb. 3 auf Seite 22.

| Kostenschätzung Stampflehm-Schwerlastwand – Bauabschnitt C, zwischen Raststätte und A14 | | | |
|--|--------------------|-------|------------------|
| Stampflehm-Schwerlastwand (Bauabschnitt C) | | | |
| Maße in Metern (B x H x T) | Fläche | 8956 | m ² |
| 1300 x 5 x 1 | Volumen | 8956 | m ³ |
| | Gewicht | 31389 | to Lehmmasse |
| | Euro exkl. USt. | | €/m ² |
| Produktion der Lehmelemente in einer nahegelegenen Feldfabrik | 4.487.591 € | | 501 € |
| Lohnkosten | 802.132 € | | 90 € |
| Materialien | 2.747.657 € | | 307 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 937.802 € | | 105 € |
| Versetzen der Lehmelemente in bauseits gesetzte Fundamente | 2.269.139 € | | 253 € |
| Lohnkosten | 798.928 € | | 89 € |
| Materialien | 459.600 € | | 51 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 513.080 € | | 57 € |
| Transport der Elemente | 497.531 € | | 56 € |
| Lieferung und Montage der Abdeckung | 311.772 € | | 35 € |
| Material | 180.146 € | | 20 € |
| Montage | 131.626 € | | 15 € |
| Gesamtkosten Produktion + Versetzen inkl Abdeckung | 7.068.501 € | | 789 € |
| Geschätzte Organisations- und Planungskosten | 441.552 € | | 49 € |
| Fachplanung + Organisation | 224.444 € | | 25 € |
| Werkplanung | 177.108 € | | 20 € |
| Genehmigung Zustimmung im Einzelfall | 40.000 € | | 4 € |
| Projektkosten ohne Fundament | 7.510.053 € | | 839 € |
| Kostenschätzung Fundament | | | |
| Fundament 200x80cm, C25/30, 200-300,- Euro/m ³ (inkl. Montage ohne Erdbau und Sauberkeitsschicht) | | | |
| Hinweis: die Kostenkennwerte beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Hochbau | | | |

Tabelle 10 Kostenschätzung Bauabschnitt C; Kostenschätzung Stand September 2020

14.2.3. Wellerlehm-Schwerlastwand

Nachfolgend die geschätzte Kostenkalkulation für die von uns für die Bauabschnitte A und E vorgeschlagene Wellerlehm-Schwerlastwände. Sie umfassen ca. 2.500 m Länge, 5 m Höhe mit einer mittleren Wandstärke von 120 cm. Für Informationen zur baulichen Ausführung siehe Abb. 3 auf Seite 22.

| Wellerlehm-Schwerlastwand Abschnitte A und E | | |
|---|------------------------|-----------------------------|
| Maße 2.500 × 5 × 1 m | Fläche | 12.500 m² |
| | Volumen | 12.500 m³ |
| | €/m² | € netto |
| Vor-Ort-Produktion | | |
| Lohnkosten | 311 € | 3.887.500 € |
| Materialkosten | 60 € | 750.000 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 76 € | 950.000 € |
| Transportkosten | 14 € | 175.000 € |
| Gesamt | 461 € | 5.762.500 € |
| Organisations- und Planungskosten | | |
| Fachplanung + Organisation | 25 € | 312.500 € |
| Werkplanung | 20 € | 250.000 € |
| Genehmigung Zustimmung im Einzelfall | 4 € | 50.000 € |
| Gesamt | 49 € | 612.500 € |
| Projektkosten ohne Fundamente (netto) | | 6.375.000 € |
| Kostenschätzung Fundament | | |
| Fundament 200x80cm, C25/30, 200-300,- Euro/m ³ | | |
| (inkl. Montage ohne Erdbau und Sauberkeitsschicht) | | |
| Hinweis: die Kostenkennwerte beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Hochbau | | |

Tabelle 11 Kostenschätzung Bauabschnitte A und E; Kostenschätzung Stand September 2020

Nachfolgend die geschätzte Kostenkalkulation für die von uns für den Bauabschnitt D vorgeschlagene Wellerlehm-Schwerlastwand. Sie umfasst ca. 1.500 m Breite, 4 m Höhe und besitzt eine mittlere Wandstärke von 1 m. Für Informationen zur baulichen Ausführung siehe Abb. 3 auf Seite 22.

| Wellerlehm-Schwerlastwand Abschnitt D | | |
|---|------------------------|----------------------------|
| Maße 1.500 × 4 × 1 m | Fläche | 6.000 m² |
| | Volumen | 6.000 m³ |
| | €/m² | € netto |
| Vor-Ort-Produktion | | |
| Lohnkosten | 311 € | 1.866.000 € |
| Materialkosten | 60 € | 360.000 € |
| Maschinen + Infrastruktur | 76 € | 456.000 € |
| Transportkosten | 14 € | 84.000 € |
| Gesamt | 461 € | 2.766.000 € |
| Organisations- und Planungskosten | | |
| Fachplanung + Organisation | 25 € | 150.000 € |
| Werkplanung | 20 € | 120.000 € |
| Genehmigung Zustimmung im Einzelfall | 4 € | 24.000 € |
| Gesamt | 49 € | 294.000 € |
| Projektkosten ohne Fundamente (netto) | | 3.060.000 € |
| Kostenschätzung Fundament | | |
| Fundament 200x80cm, C25/30, 200-300,- Euro/m ³ | | |
| (inkl. Montage ohne Erdbau und Sauberkeitsschicht) | | |
| Hinweis: die Kostenkennwerte beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Hochbau | | |

Tabelle 12 Kostenschätzung Bauabschnitt D; Kostenschätzung Stand September 2020

14.3. LCA – Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus

Eine Ökobilanzierung (gemäß DIN EN 15804) dient dazu, die Umwelteinwirkungen und die Ressourceninanspruchnahme von Bauprodukten entlang ihres gesamten Lebenszyklus zu berechnen.

Im Rahmen der Überlegungen zur alternativen Planung und Umsetzung einer Schallschutzmassnahme an der künftigen A14 ist dieser Schritt sehr wichtig, um einen Vergleich zu konventionellen Systemen vornehmen zu können.

Während das Rechenverfahren viele verschiedene Indikatoren beschreibt, haben wir uns hier hauptsächlich mit der Analyse des GWP-Indikators, der den Globalen Erwärmungseffekt in kg CO₂-Äqv. Beschreibt fokussiert.

Der erste Schritt war eine genaue Massenermittlung der 5 unterschiedlichen Systeme vorgenommen. Als Basis haben wir die zur Zeit im Planfeststellungsverfahren fixierte Länge von 570 m und Höhe von 7 m zu Grunde gelegt. Die Berechnungen beinhalten alle Bauteile und Baustoffe ab Oberkante Fundament. Im Einzelnen handelt es sich um:

14.3.1. Beschreibung der 5 untersuchten Wandtypen

Typ 01 Wellerwand 1200mm

Die 120 cm dicke Wellerlehmwand besteht aus einem Gemisch von ca. 90 Vol. Lehm sowie 10 Vol% Stroh. Die Wetterfestigkeit wird durch ein Metaldach erreicht, welches auf einer hölzernen Unterkonstruktion befestigt wird. Diese wird mit ca. 50cm langen Gewindestangen in der Wand fixiert. Trasskalkmörtel dient zum Verfüllen.

Typ 02 Stampflehmwand, 1000 mm, Schwerlast

Die 100 cm dicke Stampflehmwand besteht wird traditionell oder mit vorgefertigten Elementen errichtet. 2 cm dicke Ziegelleisten, in Trasskalkmörtel ergeben die Erosionsbremsen. Auch hier wird die Wetterfestigkeit durch ein Metaldach erreicht, die Befestigung erfolgt identisch zu der der Wellerwand.

Typ 03-Stampflehm 40 zwischen HEB 300

Hier werden vorgefertigte Stampflehmelemente, 40 cm dick und jeweils ca. 5,6m lang schichtweise zwischen Stahlstützen (HEB 300) montiert. Eine Lagerfuge aus Trasskalkmörtel dient als Verbindung. Ein schmales Stahlblechdach schützt die Lehmelement von oben.

Typ 04-Beton+Leichtbeton 16+6+4 - HEA 180

Ein marktübliches Verfahren besteht darin, dass vorgefertigte Elemente aus Normalbeton (hier 16 cm dick) mit einer schallabsorbierenden Vorsatzschale aus meist profiliertem Leichtbeton (hier 6 cm dicke Platte mit 4 cm tiefen und breiten Rippen) versehen werden.

Typ 05-Alu(120) +MinFas (80) - HEA 280

Ein weiteres Verfahren besteht darin, dass Kassetten (hier 12 cm breit, ca. 5,6 m lang) aus gelochtem Aluminium mit einem schalldämmenden Material (hier 8cm Mineralfaser) gefüllt werden. Diese Elemente werden dann zwischen vorab montierten Stahlpfosten (hier HEA 280) montiert.

14.3.2. Grundlagen und Annahmen der Berechnungen

Als nächstes wurden die 5 Konstruktion mit der vom BSSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Referat II 6 Bauen und Umwelt) zur Verfügung gestellten Software eLCA berechnet. Als Datengrundlage wurde die aktuellste, im Programm verfügbare „ökobaudat 2020“ (OBD_2020_II) verwendet.

Diese wird ständig erweitert, ergänzt und korrigiert, jedoch sind immer noch viele Daten nicht durchgängig vorhanden, sodass in den Berechnungen zum Teil unterschiedlich vollständige Datensätze mit einander verglichen werden. Auch wird nach einem Standardwert von 50 Jahren bilanziert, was einigen langlebigeren Baustoffen nicht gerecht wird.

In Bezug auf die Kosten sieht die Situation ähnlich aus: Preise sind nicht standardisiert, sie sind von der jeweiligen Marktlage, temporärer Verfügbarkeit und anderen Faktoren abhängig. - Dennoch bietet dieses Zahlenwerk einen ersten Einblick und lässt Schlüsse zu.

Im Rahmen der vorliegenden Studie war es jedoch wichtig, sich mit existierenden Werkzeugen und Datengrundlagen ein erstes Bild von der Nachhaltigkeit der LSW (Lärmschallschutzwände) zu erhalten. Ziel ist es am Ende festzustellen, ob mit den aktuell verfügbaren Werkzeugen belastbare Aussagen treffen lassen. Ggf. reicht es aber schon, eine näherungsweise Bilanz der jeweiligen Umweltauswirkungen zu skizzieren.

In der DIN EN 15978 (2012, Nachhaltigkeit von Bauwerken) sowie der DIN EN 15804 (2020, Umweltproduktdeklaration) sind dazu folgende Phasen definiert:

- Phase A (1-3): Herstellungsphase: Rohstoffbereitstellung, Transport, Herstellung
- Phase A (4-5): Errichtungsmaßnahme:
- Phase B (1-7): Nutzungsphase
- Phase C (1-4): Entsorgungsphase
- Phase D: Belastungen jenseits der Systemgrenze (z.B. Recyclingpotential, stoffliche oder energetische Verwertung)

| INFORMATIONEN ZUR BAUWERKSBEURTEILUNG | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------------|---------------------|--------------------|--------------------------|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|---|-------------|--|
| ANGABEN ZUM LEBENSZYKLUS DES BAUWERKS | | | | | | | | | | | | | | ERGÄNZENDE INFORMATIONEN AUSSERHALB DES LEBENSZYKLUS DES BAUWERKS | | |
| A1 - A3 HERSTELLUNGS- PHASE | | | A4 - A5 BAUPHASE | | B1 - B7 NUTZUNGSPHASE | | | | | | | C1 - C4 ENTSORGUNGSPHASE | | | | D |
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Rohstoffbereitstellung | Transport | Herstellung | Transport | Bau-/Einbauprozess | Nutzung | Instandhaltung | Reparatur | Ersatz ¹ | Umbau/Erneuerung | betrieblicher Energieeinsatz | betrieblicher Wassereinsatz | Rückbau, Abriss | Transport | Abfallbehandlung | Deponierung | Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial |
| Szenario Szenario Szenario | | | Szenario Szenario | | Szenario Szenario | | Szenario Szenario | | Szenario Szenario | | Szenario Szenario | | Szenario Szenario | | Szenario | |
| von der Wiege bis zum Werkstor mit den Modulen C1-C4 und Modul D | | | | | | | | | | | | | | | Pflicht | |
| von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen, den Modulen C1-C4 und Modul D | | | | | | | | | | | | | | | Pflicht | |
| von der Wiege bis zur Baure und Modul D | | | | | | | | | | | | | | | Pflicht | |
| von der Wiege bis zum Werkstor ² | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen ² | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abb. 88 Abbildung aus: DIN EN 15805:2020-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken: unterschiedliche Betrachtungsszenarien

14.3.3. Rechenergebnisse

Hier die ersten Rechenergebnisse zur Übersicht, eingrenzend auf einige Indikatoren begrenzt:

Treibhauspotenzial (GWP); Ozonbildungspotenzial (POCP);Versauerungspotenzial (AP); Überdüngungspotenzial (EP); Primärenergie gesamt (PE); Primärenergie, total (PE Ges.) Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT); Total erneuerbare Primärenergie (PERT).

| Typ 01 | | Die 120 cm dicke Wellerlehmwand aus ca. 90 Vol. Lehm + 10 Vol% Stroh; Metalldach auf hölzerner Unterkonstruktion; Trasskalkmörtel zum Verfüllen. Fundament+Sockel | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|---|---------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| Gesamteinsatz | | | | | | | | |
| Lebenszyklus | GWP | POCP | AP | EP | PE Ges. | PENRT | PERT | |
| | kg CO2-Äqv. | kg Ethen-Äqv. | kg SO2-Äqv. | MJ | MJ | MJ | MJ | |
| A1 - A3 | 348.790,00 | 110,39 | 793,67 | 166,94 | 5.607.600,00 | 3.665.600,00 | 1.942.100,00 | |
| C3 | 100.750,00 | 22,02 | 203,56 | 49,03 | -61.930,00 | 641.380,00 | -703.310,00 | |
| C4 | 6.141,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -74.700,00 | 0,00 | -74.700,00 | |
| C3 + C4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Summe A+C | 455.680,00 | 132,41 | 997,23 | 215,96 | 5.471.000,00 | 4.306.900,00 | 1.164.100,00 | |
| D | -74.064,00 | -19,81 | -217,40 | -42,79 | -1.063.100,00 | -926.250,00 | -136.860,00 | |
| Summe A+C+D | 381.616,00 | 112,61 | 779,83 | 173,18 | 4.407.900,00 | 3.380.650,00 | 1.027.240,00 | |
| Masse 11203966,48 kg | | | | | | | | |
| Kostenansätze | | | | | | | | |
| Erstellung | Summen | Fundament | Sockel | Wand (von) | Wand (Mittelwert | Wand (bis) | Dach | |
| | 1.998.716,21 | 228.000,00 | 75.924,00 | | 1.653.627,00 | | 41.165,21 | |
| Instandhaltung | Frequenz/50 a | 0,00 | 1,00 | | 5,00 | | 10,00 | (Variable) |
| | Anteil/Kosten | 0,0100 | 0,0250 | | 0,0010 | | 0,0200 | |
| | Kosten/Interv. | | | | 1.653,63 | | 1.646,61 | |
| | 18.399,28 | 0,00 | 1.898,10 | | 8.268,14 | | 8.233,04 | |
| Invest+Inst. | | | | | | | | |
| Total 01 | 2.017.115,48 | | | | | | | |
| CO2-Preis (25€/t) | 11.392,00 | | | | | | | LCA-Life Cycle Assessment - LCC-Life Cycle Cost |
| Total 02 | 2.028.507,48 | | | | | | | Zusammenstellung inkl. A1-3, C3, C4 |
| CO2-Preis (180€/t) | 82.022,40 | | | | | | | ohne D* (*nur fragmentarische Datensätze); |
| Total 03 | 2.099.137,88 | | | | | | | überarbeitet, berechnet mit eLCA vom BBSR; |
| | | | | | | | | Berechnung und Kostenschätzwerte Stand 07-02-2021; Prof. Heiner Lippe |

Tabelle 13 Rechenergebnisse Typ 01

| Typ 02 | | Stampflehmwand 100 cm dick, aus vorgefertigten Elementen; Erosionsbremsen durch Ziegelleisten in Trasskalkmörtel; Metalldach auf hölzerner Unterkonstruktion + Trasskalkmörtel zum Verfüllen; Fundament+Sockel | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|--|---------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| Gesamteinsatz | | | | | | | | |
| Lebenszyklus | GWP | POCP | AP | EP | PE Ges. | PENRT | PERT | |
| | kg CO2-Äqv. | kg Ethen-Äqv. | kg SO2-Äqv. | MJ | MJ | MJ | MJ | |
| A1 - A3 | 503.420,00 | 107,91 | 766,65 | 133,55 | 5.136.900,00 | 3.909.400,00 | 1.227.500,00 | |
| C3 | 42.363,00 | 20,06 | 184,90 | 44,62 | 553.820,00 | 591.060,00 | -37.247,00 | |
| C4 | 4,37 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 65,06 | 60,10 | 4,96 | |
| C3 + C4 | 42.367,37 | 20,06 | 184,93 | 44,62 | 553.885,06 | 591.120,10 | -37.242,04 | |
| Summe A+C | 545.780,00 | 127,97 | 951,58 | 178,17 | 5.690.800,00 | 4.500.500,00 | 1.190.300,00 | |
| D | -44.391,00 | -14,43 | -157,45 | -34,04 | -593.790,00 | -562.920,00 | -30.871,00 | |
| Summe A+C+D | 501.389,00 | 113,54 | 794,14 | 144,14 | 5.097.010,00 | 3.937.580,00 | 1.159.429,00 | |
| Masse 10622414,80 kg | | | | | | | | |
| Kostenansätze | | | | | | | | |
| Erstellung | Summen | Fundament | Sockel | Wand (von) | Wand (Mittelwert | Wand (bis) | Dach | |
| | 3.353.491,37 | 228.000,00 | 75.924,00 | | 3.013.191,00 | | 36.376,37 | |
| Instandhaltung | Frequenz/50 a | 0,00 | 1,00 | | 5,00 | | 10,00 | (Variable) |
| | Anteil/Kosten | 0,0100 | 0,0250 | | 0,0010 | | 0,0200 | |
| | Kosten/Interv. | | | | 3.013,19 | | 1.455,05 | |
| | 24.239,33 | 0,00 | 1.898,10 | | 15.065,96 | | 7.275,27 | |
| Invest+Inst. | | | | | | | | |
| Total 01 | 3.377.730,70 | | | | | | | |
| CO2-Preis (25€/t) | 13.644,50 | | | | | | | LCA-Life Cycle Assessment - LCC-Life Cycle Cost |
| Total 02 | 3.391.375,20 | | | | | | | Zusammenstellung inkl. A1-3, C3, C4 |
| CO2-Preis (180€/t) | 98.240,40 | | | | | | | ohne D* (*nur fragmentarische Datensätze); |
| Total 03 | 3.475.971,10 | | | | | | | überarbeitet, berechnet mit eLCA vom BBSR; |
| | | | | | | | | Berechnung und Kostenschätzwerte Stand 07-02-2021; Prof. Heiner Lippe |

Tabelle 14 Rechenergebnisse Typ 02

| Typ 03 | | Stampflehmelemente 40cm dick in 6 Lagen zwischen HEB 300; Lagerfuge aus Trasskalkmörtel; Metalldach; Fundament+Sockel | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|---|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|--|
| Gesamteinsatz | | | | | | | | |
| Lebenszyklus | GWP | POCP | AP | EP | PE Ges. | PENRT | PERT | |
| | kg CO2-Äqv. | kg Ethen-Äqv. | kg SO2-Äqv. | MJ | MJ | MJ | MJ | |
| A1 - A3 | 524.630,00 | 137,83 | 913,70 | 138,98 | 6.164.900,00 | 4.715.000,00 | 1.449.900,00 | |
| C3 | 17.144,00 | 8,69 | 81,69 | 19,34 | 329.550,00 | 289.460,00 | 40.089,00 | |
| C4 | 615,83 | 0,30 | 3,91 | 0,44 | 10.169,00 | 8.988,90 | 1.179,80 | |
| C3 + C4 | 17.759,83 | 8,99 | 85,61 | 19,78 | 339.719,00 | 298.448,90 | 41.268,80 | |
| Summe A+C | 542.390,00 | 146,82 | 999,31 | 158,76 | 6.504.600,00 | 5.013.400,00 | 1.491.200,00 | |
| D | -61.845,00 | -17,01 | -165,31 | -25,26 | -706.110,00 | -626.260,00 | -79.851,00 | |
| Summe A+C+D | 480.545,00 | 129,80 | 834,00 | 133,50 | 5.798.490,00 | 4.387.140,00 | 1.411.349,00 | |
| Masse 6120459,26 kg | | | | | | | | |
| Kostenansätze | | | | | | | | |
| Erstellung | Summen | Fundament | Sockel | Wand (von) | Wand (Mittelwert Wand (bis) | Dach | | |
| | 2.307.758,93 | 228.000,00 | 75.924,00 | | 1.972.131,60 | 31.703,33 | | |
| Instandhaltung | Frequenz/50 a | 0,00 | 1,00 | | 5,00 | 10,00 (Variable) | | |
| | Anteil/Kosten | 0,0100 | 0,0250 | | 0,0010 | 0,0200 | | |
| | Kosten/Interv. | | | | 1.972,13 | 1.268,13 | | |
| | 18.099,42 | 0,00 | 1.898,10 | | 9.860,66 | 6.340,67 | | |
| Invest+Inst. | | | | | | | | |
| Total 01 | 2.325.858,36 | | | | | | | |
| CO2-Preis (25€/t) | 13.559,75 | LCA-Life Cycle Assessment - LCC-Life Cycle Cost | | | | | | |
| Total 02 | 2.339.418,11 | Zusammenstellung inkl. A1-3, C3, C4 | | | | | | |
| CO2-Preis (180€/t) | 97.630,20 | ohne D* (*nur fragmentarische Datensätze); | | | | | | |
| Total 03 | 2.423.488,56 | überarbeitet, berechnet mit eLCA vom BBSR; | | | | | | |
| | | Berechnung und Kostenschätzwerte Stand 07-02-2021; Prof. Heiner Lippe | | | | | | |

Tabelle 15 Rechenergebnisse Typ 03

| Typ 04 | | 16cm Normalbeton + schallabsorbierenden Vorsatzschale: 6cm Leichtbeton + 4 cm tiefen und breiten Rippen; Metalldach; Fundament+Sockel | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|---|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--|
| Gesamteinsatz | | | | | | | | |
| Lebenszyklus | GWP | POCP | AP | EP | PE Ges. | PENRT | PERT | |
| | kg CO2-Äqv. | kg Ethen-Äqv. | kg SO2-Äqv. | MJ | MJ | MJ | MJ | |
| A1 - A3 | 414.990,00 | 59,60 | 659,31 | 100,47 | 3.556.200,00 | 2.797.500,00 | 758.710,00 | |
| C3 | 11.069,00 | 5,20 | 57,60 | 9,93 | 197.980,00 | 173.100,00 | 24.876,00 | |
| C4 | 4.688,70 | 2,26 | 29,79 | 3,35 | 77.420,00 | 68.438,00 | 8.982,50 | |
| C3 + C4 | 15.757,70 | 7,46 | 87,39 | 13,28 | 275.400,00 | 241.538,00 | 33.858,50 | |
| Summe A+C | 430.750,00 | 67,06 | 746,69 | 113,75 | 3.831.600,00 | 3.039.000,00 | 792.570,00 | |
| D | -19.999,00 | -3,01 | -45,21 | -6,85 | -273.990,00 | -223.660,00 | -50.331,00 | |
| Summe A+C+D | 410.751,00 | 64,05 | 701,48 | 106,90 | 3.557.610,00 | 2.815.340,00 | 742.239,00 | |
| Masse 2798350,34 kg | | | | | | | | |
| Kostenansätze | | | | | | | | |
| Erstellung | Summen | Fundament | Sockel | Wand (von) | Wand (Mittelwert Wand (bis) | Dach | | |
| | 2.278.901,25 | 114.000,00 | 18.981,00 | 954.750,00 | 2.138.640,00 | 3.322.530,00 | 7.280,25 | |
| Instandhaltung | Frequenz/50 a | 0,00 | 1,00 | | 10,00 | 10,00 (Variable) | | |
| | Anteil/Kosten | 0,0100 | 0,0250 | | 0,0010 | 0,0200 | | |
| | Kosten/Interv. | | | | 4.277,28 | 291,21 | | |
| | 23.316,97 | 0,00 | 474,53 | | 21.386,40 | 1.456,05 | | |
| Invest+Inst. | | | | | | | | |
| Total 01 | 2.302.218,22 | | | | | | | |
| CO2-Preis (25€/t) | 10.768,75 | LCA-Life Cycle Assessment - LCC-Life Cycle Cost | | | | | | |
| Total 02 | 2.312.986,97 | Zusammenstellung inkl. A1-3, C3, C4 | | | | | | |
| CO2-Preis (180€/t) | 77.535,00 | ohne D* (*nur fragmentarische Datensätze); | | | | | | |
| Total 03 | 2.379.753,22 | überarbeitet, berechnet mit eLCA vom BBSR; | | | | | | |
| | | Berechnung und Kostenschätzwerte Stand 07-02-2021; Prof. Heiner Lippe | | | | | | |

Tabelle 16 Rechenergebnisse Typ 04

| Typ 05 | | Elemente aus 12cm dicken Kassetten aus Alulochblech mit 8cm Mineralfaserfüllung zwischen – HEA 280-Stützen; Wetterfestigkeit durch Metalldach | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| Gesamteinsatz | | | | | | | |
| Lebenszyklus | GWP | POCP | AP | EP | PE Ges. | PENRT | PERT |
| | kg CO2-Äqv. | kg Ethen-Äqv. | kg SO2-Äqv. | MJ | MJ | MJ | MJ |
| A1 - A3 | 861.190,00 | 184,98 | 2.399,30 | 212,90 | 13.635.000,00 | 10.410.000,00 | 3.225.100,00 |
| C3 | 3.053,60 | 0,49 | 5,73 | 1,10 | 50.430,00 | 39.928,00 | 10.502,00 |
| C4 | 464,45 | 0,21 | 2,76 | 0,38 | 7.018,80 | 6.245,70 | 773,08 |
| C3 + C4 | 3.518,05 | 0,71 | 8,49 | 1,48 | 57.448,80 | 46.173,70 | 11.275,08 |
| Summe A+C | 883.540,00 | 190,21 | 2.498,60 | 224,53 | 13.896.000,00 | 10.633.000,00 | 3.263.600,00 |
| D | -466.880,00 | -90,58 | -1.482,50 | -98,98 | -8.056.300,00 | -6.107.100,00 | -1.949.100,00 |
| Summe A+C+D | 416.660,00 | 99,62 | 1.016,10 | 125,55 | 5.839.700,00 | 4.525.900,00 | 1.314.500,00 |
| Masse 1477300,03 kg | | | | | | | |
| Kostenansätze | | | | | | | |
| Erstellung | Summen | Fundament | Sockel | Wand (von) | Wand (Mittelwert Wand (bis) | Dach | |
| | 2.167.295,67 | 159.600,00 | 18.981,00 | 954.750,00 | 2.138.640,00 | 3.322.530,00 | 9.674,67 |
| Instandhaltung | Frequenz/50 a | 0,00 | 1,00 | | 25,00 | | 10,00 (Variable) |
| | Anteil/Kosten | 0,0100 | 0,0250 | | 0,0010 | | 0,0200 |
| | Kosten/Interv. | | | | 10.693,20 | | 386,99 |
| | 55.875,46 | 0,00 | 474,53 | | 53.466,00 | | 1.934,93 |
| Erstellung+Inst. | | | | | | | |
| Total 01 | 2.223.171,13 | | | | | | |
| CO2-Preis (25€/t) | 22.088,50 | | | | | | |
| Total 02 | 2.245.259,63 | | | | | | |
| CO2-Preis (180€/t) | 159.037,20 | | | | | | |
| Total 03 | 2.382.208,33 | | | | | | |

LCA-Life Cycle Assessment - LCC-Life Cycle Cost
Zusammenstellung inkl. A1-3, C3, C4
ohne D* (*nur fragmentarische Datensätze);
überarbeitet, berechnet mit eLCA vom BBSR;
Berechnung und Kostenschätzwerte Stand 07-02-2021; Prof. Heiner Lippe

Tabelle 17 Rechenergebnisse Typ 05

| | Typ 01 | Typ 02 | Typ 03 | Typ 04 | Typ 05 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Total 01 - Erstellung+Inst. | 2.017.115,48 | 3.377.730,70 | 2.325.858,36 | 2.302.218,22 | 2.223.171,13 |
| | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| CO2-Preis (25€/t) | 11.392,00 | 13.644,50 | 13.559,75 | 10.768,75 | 22.088,50 |
| | 2 | 4 | 3 | 1 | 5 |
| Total 02 - Erstellung+Inst.+CO2 25€/t | 2.028.507,48 | 3.391.375,20 | 2.339.418,11 | 2.312.986,97 | 2.245.259,63 |
| | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| CO2-Preis (180€/t) | 82.022,40 | 98.240,40 | 97.630,20 | 77.535,00 | 159.037,20 |
| | 2 | 4 | 3 | 1 | 5 |
| Total 03 - Erstellung+Inst.+CO2 180€/t | 2.099.137,88 | 3.475.971,10 | 2.423.488,56 | 2.379.753,22 | 2.382.208,33 |
| | 1 | 5 | 4 | 2 | 3 |

Wertung 1-5: niedriger - hoher Preis

Tabelle 18 Synopsis aus Emission und CO₂-Bepreisung, auch fiktiv; grobe Wertung in der Tabelle betrifft die Reihenfolge, dh. : 1 bedeutet geringster Kostenwert, 5 höchster Kostenwert.

14.3.4. Zwischenfazit Kosten und CO₂

Die Übersicht zeigt die Abhängigkeiten der jeweilig gewählten Konstruktion in Bezug auf eine fiktive CO₂-Bepreisung sowie den zu erwartenden Unterhaltskosten in einen Zeitraum von 50 Jahren. Letztlich scheinen die Kosten aller 5 Typen relativ dicht aneinander zu liegen, was nicht unbedingt zu erwarten war.

Hier wird die ungenügende Datenlage bereits vermutet: energie- und CO₂-emittierende Baustoffe (z.B. Beton, Aluminium) stehen noch relativ gut da, während zum Beispiel der Wand-Typ 02, die Stampflehmwand, fast am schlechtesten abzuschneiden scheint.

An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen und Berechnungen erforderlich. Einige Richtungen seien hier aufgezeigt:

1. Sichtung der aktuell existierenden Datenbanken-vor allem der ökobaudat) bezüglich Vollständigkeit, Plausibilität und Vergleichbarkeit;

2. Ansetzen einer erweiterten Lebenszyklusbetrachtung: die von Lehmwänden erreichbare, hohe Lebensdauer ist ein absoluter, ökologischer Vorteil, der standardmäßig noch nicht abgebildet wird;
3. Instandhaltungszyklen und deren Kosten müssen eingehend geprüft werden, bei allen 5 Bauarten;
4. Reelle Daten von konventionellen LSW (Lärmschutzwänden) sind erforderlich, um die Plausibilität des Vergleichs zu erhöhen; im vorliegenden Fall sind sie geschätzt, zum Teil aus nicht dokumentierbaren Einzelangaben von Experten aus diesen Bereichen sowie dem Internet, jedoch mit der größtmöglichen Plausibilität zusammengestellt
5. Versuche, weitere positive Aspekte zu quantifizieren: Baukultur, Identität, Sozialstruktur. Hier liegt ein ganz wichtiger Aspekt, da ja dieses Projekt seinen großen Mehrwert und dadurch auch seine Wirtschaftlichkeit aus einem Zusammenspiel vieler, unterschiedlicher Faktoren erhält.

Zur Auswertung und zum Vergleich haben wir in der Folge die Einzelaspekte betrachtet. Die Diagramme zeigen eindeutig die jeweilige Datenlage der Konstruktionstypen 001 bis 005 und bestätigen die Eingangshypothese in Bezug auf die positive Nachhaltigkeitsaspekte der Varianten in Lehmbauweisen (001, 002, 003).

Herstellungsphase A

Hier werden die Einflüsse der Herstellungsphase der in Bezug auf das GWP (Global Warming Potential) aufgelistet und summiert. Im Einzelnen betrifft dies:

„Rohstoffgewinnung und -verarbeitung und Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen, (z. B. Recyclingprozesse), Transport zum Hersteller, einschließlich der Bereitstellung von allen Stoffen, Produkten und Energie, sowie die vollständige Abfallbehandlung bis zum Ende des Abfallstatus oder die Beseitigung der Restabfälle während der Herstellungsphase.“
(Quelle: DIN EN 15804 (7/2014) , 6.2.2 A1-A3, Herstellungsphase, Informationsmodule)

Bei der Auswertung ist festzustellen, dass der Wandtyp 001 die geringsten Werte aufweist. Das liegt unter anderem daran, dass hier ein hoher Anteil Stroh enthalten ist (nachwachsender Rohstoff=neutrale bis positive CO₂-Bilanz). Aber auch die beiden Lehm-Wände Typ 002 und Typ 003 haben keine hohen Werte. Typ 02 kann aufgrund des geringen Gesamt-Materialvolumens etwas bessere Werte ausweisen, wohingegen in Typ 05 die Bilanz durch den Baustoff Aluminium, welcher einer sehr hohen Primärenergieinhalt aufweist, sehr hoch ausfällt.

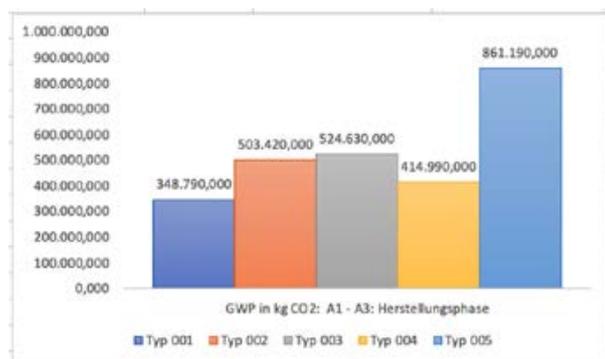


Abb. 89 Herstellungsphase A

Entsorgungsphase C

Das nächste Diagramm beschreibt die Entsorgungsphase. Die Ergebnisse lassen sich kaum erklären, bedürfen weiterer Untersuchungen. Vermutlich ist hier die vorhandene Datenlage nicht ausreichend, sodass wie bei Typ 01 der Wert „0“ angegeben wird. Der Rückbau einer reinen Stampflehmwand soll demnach fast das 12-fache des Typ 05, der Wand aus Mineralwolle und Aluminium betragen.

Hinweis: Viele Gespräche im Fachkollegenkreis haben hier eine Fragestellung in Bezug auf die hinterlegten Daten der *ökobaodat* aufgeworfen. Die Tatsache, dass ein unbehandelter, rein mineralisch zusammengesetzter Lehmbaustoff unendlich recycelbar ist, wurde anscheinend nicht ausreichend dargestellt.

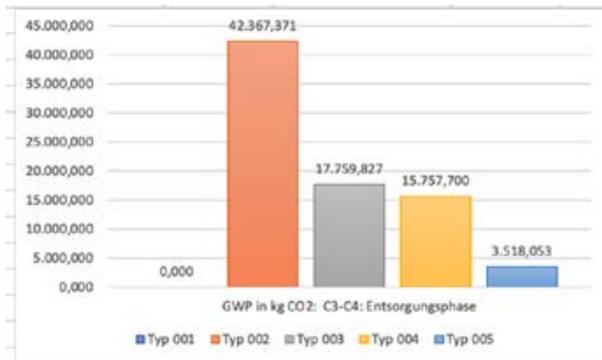


Abb. 90 Entsorgungsphase C

Summe A-C

In der Summe der bisherigen Aspekte (A-C) bestätigt sich nun das Anfangsbild: In Bezug auf den Indikator GWP (Global Warming Potential) weisen die 3 Typen in Lehm- bzw. Lehm-Hybridbauweise niedrige Werte auf, allerdings scheint der Typ 04, die Wand aus Beton den Platz eins zu belegen. Auch hier müssen Datengrundlagen hinterfragt werden.

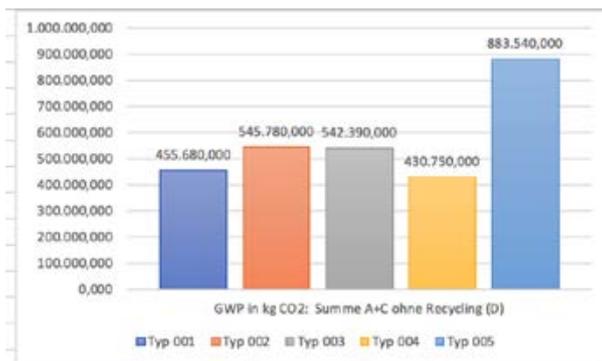


Abb. 91 Summe A-C

Recyclingphase D

Ein spezielle Rubrik der Ökobilanzierung stellt die Phase D, das Recyclingpotential da. Dieses Modul umfasst Gutschriften und Lasten in Bezug auf Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und/oder Recyclingpotenziale, als Nettoflüsse und Gutschriften (Vorteile) angegeben. Anhand der durchgehend „negativenWerte“ ist festzustellen, dass alle untersuchten Bauteile ein „positives“ Recyclingpotential besitzen.

Die mit großem Abstand besten Werte weist hier Bauteil 005 auf: einmal abgebaut lässt sich der hohe Anteil an Aluminium sehr gut recyceln. Im Fall des Bauteils 004 sieht es da am schlechtesten aus: die Elemente aus Beton und Leichtbeton reduzieren die Recyclebarkeit. Etwas unverständlich bleibt wieder die Bewertung der 3 Elemente, die Lehm beinhalten: Lehm ist ein unbegrenzt und nur mit absolut geringem Aufwand wiederzuverwertendes Material! Auch dies kann ggf. an der zur Verfügung stehenden Datenlage liegen.

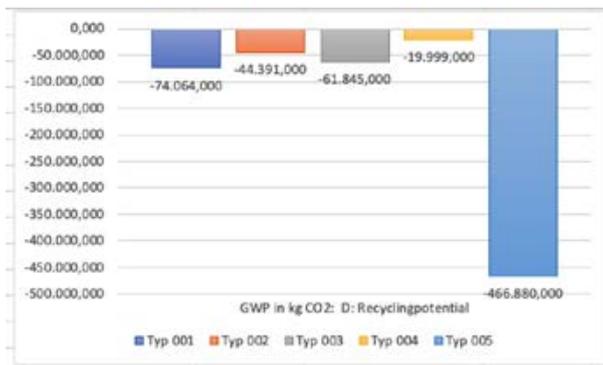


Abb. 92 Recyclingphase D

Gesamtbilanz

In der Gesamtbilanz, welche alle Phasen beinhaltet ergibt sich nun folgendes Bild:

Alle 5 Typen, liegen mit ihren Werten relativ dicht beieinander. Unerklärlicherweise zeigt die reine Stampflehmwand die schlechteste Bilanz.

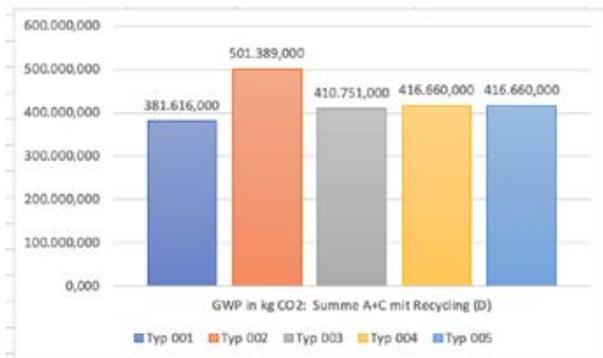


Abb. 93 Vergleichende Gesamtbilanz

Fazit: Im Rahmen einer ersten Ökobilanzierung konnte bestätigt werden, dass eine Bauweise mit nachhaltigen, lokal verfügbaren Baustoffen sich als zukunftsweisend, den nationalen, europäischen sowie globalen Zielen entsprechend darstellt.

Dazu ist es nun weiter wichtig, dass Datenlagen und Berechnungsverfahren geprüft und aktualisiert werden, auf der anderen Seite entsprechende Verfahrenstechnik optimiert, entwickelt und/oder abgeleitet werden, die ausgehend von dem hier zu prüfenden Verwendungszweck auch aussichtsreich für die teilweise Verwendung im Hochbaubereich gelten kann.

Zur Zeit sind weitere Forschungsvorhaben unter anderem bei der *dbu* angestrengt worden, die zum Ziel haben, die Datenlage in Bezug auf Lehmprojekte sowie den Umgang, die Berechnungs- und Bewertungsmöglichkeiten zu aktualisieren und vor allem zu ergänzen. Wir zitieren hier:

- Entwicklung von Rahmenbedingungen zur Erstellung von Muster UPD für Lehmstoffe (Lehm UPD); Projekt der Kollegen Dr. Horst Schroeder und Dipl. Ök. Manfred Lemke, vom Dachverband Lehm e.V.; AZ 32885

Dieses Vorhaben wurde 2018 beendet, es dient als wichtige Grundlage für das Folgeprojekt:

- Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehmputz, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings, Projekt der Kollegen Dr. Horst Schroeder und Dipl. Ök. Manfred Lemke, vom Dachverband Lehm e.V.; AZ 35658/01

Eine Fertigstellung wird zum März 2022 erwartet.

14.4. Wartungskosten

Auch Wartung und Pflege gehören zu einer ganzheitlichen, den gesamten Lebenszyklus in Betracht ziehenden Kalkulation.

Die Lärmschutzwand (Stampflehm und Wellerlehm) ist so konzipiert, dass in der Bauphase 2 bis 2,5 cm zur berechneten Wandstärke zugegeben werden um die Initialerosion auszugleichen. Wie unter „10. Dauerhaftigkeit“ auf Seite 62 erläutert, reduziert sich die Erosion im Laufe der Zeit progressiv durch die jeweilige Lehmmarmierung und lediglich oberflächliches Auswaschen der weichen Lehmenteile. Es ist daher nicht damit zu rechnen, dass diesbezüglich Wartungsaufgaben anfallen. In diesem Zusammenhang ist jedenfalls zu beachten, dass der Betonsockel nicht überstehen sollte; d.h. der Lehm sollte immer über den Betonsockel überstehen oder anschließen.

Im Rahmen von Lehmbaubauwerken werden Wartungskosten jedoch deswegen nur eine untergeordnete Rolle spielen, da deren Langlebigkeit bereits erwiesen ist. Nach einer baulich kalkulierten Initialerosion (siehe Abschnitt 10 auf Seite 62) werden sich die Wartungsaufgaben im Wesentlichen auf periodische Inspektionen in zeitlichen Intervallen beschränken. Die exakten Zeitintervalle können derzeit nicht genau ermittelt werden, da sie von der jeweils verwendeten Bautechnik abhängig sind.

Wartungsarbeiten sind voraussichtlich für die Nisthilfen der Fledermäuse erforderlich, da diese aus der Witterung ausgesetztem Holz bestehen. Projektiert ist dafür jedoch langlebiges Lärchenholz, das wegen seiner Witterungsbeständigkeit traditionell z.B. für Fensterrahmen verwendet wurde.

Die Abdeckung sollte in längeren Abständen auf Dichtigkeit (Schraubverbindungen) überprüft und ggf. ausgebessert werden.

14.5. Wirtschaftliche Bedeutung

Im Rahmen der Projektlaufzeit sind auch erste Erkundungen unternommen worden, um festzustellen, welches Marktpotential im Bereich Lehmbau existiert bzw. zu erwarten ist. Dazu ist eine Bachelorarbeit im Bereich der Wirtschaftswissenschaften der TH Lübeck angefertigt worden, aus der Elemente zitiert werden.

Zielsetzung dieser Abschlussarbeit war es herauszufinden, ob sich aus den Überlegungen, Tests, Erkenntnissen und Planungen zur Lehmlärmschutzwand weitere Anwendungen für den Baustoff Lehm im Hochbau identifizieren ließen.

Wesentliche Aspekte bleiben zu untersuchen:

- Technische und funktionale Relevanz von Lehm als zeitgemässe Alternative zu konventionellen, weniger nachhaltigeren Baustoffen
- Existenz und/oder Potential von Absatzmärkten
- Entwicklungsmöglichkeiten für regionale Produktionsstrukturen
- Existenz und/oder Aufbau von regionalem Knowhow.

14.5.1. Grundinformationen

Zunächst aber einige Grundinformationen:

Rohbaustoffe

Im deutschen Wohnungsbau werden knapp dreißig Prozent der fertiggestellten Neubauwohnungen durch Mauersteine (Ziegel) errichtet, siehe Abb. 94. Die Vorteile von Ziegel liegen aufgrund der jahrhundertelangen Tradition und des industrialisierten Ausbaus von Produktionsstätten und Vertriebsnetzen im Bekanntheitsgrad und der hohen Verfügbarkeit. Es können Produkte unterschiedlicher Druckfestigkeiten, Wärmedämmeigenschaften sowie optischer Merkmale für viele Verwendungszwecke angeboten werden.

Als wesentliche Nachteile von Ziegelprodukten im Vergleich sind der hohe Energiebedarf bei der Herstellung. Am Lebensende der Ziegel ist in der Regel nur ein „downcycling“ möglich, das bedeutet eine Weiterverwendung auf geringerem Qualitätsniveau. Auch dieser Schritt ist energieaufwändig, das mineralische Ausgangsmaterial (Ton, Lehm, Sand) kann nicht in seinen Ursprungs-eigenschaften wiederhergestellt werden.

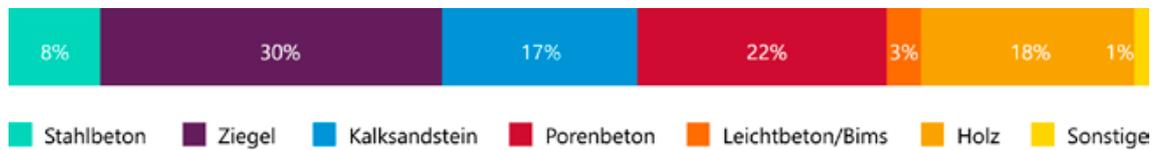


Abb. 94 Verwendete Baustoffe für fertiggestellte Wohngebäude 2019 (Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis))

Die Abbildung des statistischen Bundesamtes, nach Berechnungen der Bau-Info-Consult, zeigt die Häufigkeit der Baustoffe, wie sie 2019 im Wohnungsbau Verwendung fanden, sie bestätigt die hohe Verwendung der konventionellen, mineralischen Baustoffe. Festzustellen ist jedoch auch der relativ hohe Anteil an Holz. Diesem Material kommt als nachwachsender Rohstoff bereits heute eine zunehmende Bedeutung zu. So hat der Bund Deutscher Zimmermeister hierzu 2018 eine Holzbauquote bei Ein- und Zweifamilienhäusern von 20,3% errechnet.

Unter die „sonstigen Baustoffe“ der Abbildung mit einem Marktanteil von einem Prozent fallen unter anderem die Lehm- baustoffe.

| | Stahl | | Stahlbeton | | Ziegel | | Kalksandst. | | Porenbeton | | Leichtbeton / Bims | | Holz | | Sonstige Baustoffe | |
|--|--------------------|------|------------|------|--------|------|-------------|------|------------|------|--------------------|------|------|------|--------------------|------|
| | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 | 2018 | 2017 |
| | Angaben in Prozent | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nichtwohngebäude gesamt | 25 | 25 | 55 | 57 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 0 | 0 | 6 | 5 | 3 | 2 |
| Anstaltsgebäude | 3 | 0 | 54 | 56 | 11 | 10 | 27 | 27 | 3 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Büro- und Verwaltungsgebäude | 5 | 5 | 77 | 76 | 5 | 5 | 7 | 7 | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| Sonstige Nichtwohngebäude | 7 | 9 | 57 | 40 | 10 | 7 | 12 | 11 | 4 | 2 | 1 | 1 | 9 | 8 | 1 | 1 |
| Fabrik- und Werkstattgebäude | 31 | 32 | 57 | 57 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| Handelsgebäude | 11 | 13 | 62 | 62 | 13 | 12 | 8 | 6 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Warenlagergebäude | 31 | 32 | 56 | 59 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Hotels und Gaststätten | 3 | 2 | 67 | 71 | 14 | 10 | 8 | 7 | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Ausgewählte Infrastrukturgebäude | 8 | 7 | 55 | 61 | 10 | 8 | 15 | 14 | 3 | 2 | 1 | 1 | 6 | 5 | 1 | 1 |
| Landwirtschaftliche Betriebsgebäude | 35 | 37 | 32 | 30 | 7 | 6 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 19 | 4 | 6 |
| Nichtwohngebäude im Fertigbau | 31 | 33 | 60 | 59 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 4 | 3 | 3 |

Tabelle 19 Verwendete Baustoffe für den Nichtwohnbau (Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021)

In Nichtwohngebäuden sehen die Marktanteile etwas anders aus. Wie in Tabelle 19 des statistischen Bundesamtes (Destatis) von 2021 dargestellt, steht der Stahlbeton mit 57% im Jahr 2017 an erster Stelle. Bis auf den Stahl mit 25% Marktanteil sind die Marktanteile der anderen Baustoffe sehr gering. Der Marktanteil von Ziegel für Nichtwohngebäude liegt mit fünf Prozent deutlich unter dem der Marktanteile von Wohngebäuden.

Innenausbau

Die beiden oben zitierten Statistiken beschreiben vornehmlich die Situation der mineralischen Baustoffe, wie sie meist auch als tragende Element eingesetzt werden. Ein weiterer, großer Anwendungsbereich, der mit Lehmstoffen bereits praktiziert wird, ist der Trockenbau.

Dieser umfasst die Anfertigung raumbegrenzender Konstruktionen sowie Bekleidungen, insbesondere für Wand, Decke und Boden. Auf der Baustelle werden industriell vorgefertigte Bauteile durch Schraub-, Klemm-, oder Steckmontage miteinander verbunden, anschließend mit entsprechenden Paletten beplankt. Den Abschluss bildet in der Regel eine Verspachtelung, ein anschließender Verputz mit Anstrich und/oder eine Tapezierung.

Die Beplankung eines klassischen Trockenbaus besteht aus Gipskarton- oder Gipsfaserplatten, Metall- oder Holzständerwerke dienen der Unterkonstruktion, Mineralwoll- oder Mineralwolle-Dämmstoffe dem Brandschutz und der Schalldämmung.

14.5.2. Fazit

Aus den beschriebenen Statistiken sowie den geführten Interviews kristallisieren sich verschiedene, zukunftsversprechende Anwendungsbereiche für Lehmstoffe heraus:

- Bedingt: vorgefertigte Bauelemente aus Schwer-, Weller- oder Leichtlehm, zum Teil tragend, zum Teil ausfachend
- Ersatz von „Leichtbauwänden“ durch Beplankungssystemen mit Lehmplatten
- Entwicklung von raumtrennenden Wandelementen aus Lehm, ähnlich der bereits existierenden Platten aus gepresstem Stroh
- Sämtliche Oberflächenbeschichtungen können bereits jetzt mit Lehmprodukten ausgeführt werden: Lehmputze anstatt Gipsputze sowie Lehmwandfarben anstatt Dispersionsfarben.

Bei diesen benannten Lehmstoffen gab es bereits in den vergangenen Jahren ein bemerkenswertes Wachstum. Entsprechende Normen sind erstellt worden, befinden sich in einer ständigen Aktualisierung. Dadurch wird dem Planer und Ausführenden eine zusätzliche Sicherheit gegeben, welches Risiken begrenzen lässt. Auch dies wirkt sich dann positiv auf die Kostengestaltung aus.

Vor dem Hintergrund der steigenden Sensibilität der Gesellschaft hinsichtlich eines Nachhaltigkeitsbewusstseins sind hier in den nächsten weiteren Steigerungen zu erwarten.

Um die Nachfrage dann zu bedienen, müssen erforderliche Produktionsmengen geschaffen werden. Dadurch wird sich auch das aktuelle Preisgefüge für den Verbraucher positiv entwickeln können.

Aus den genannten Gründen besteht eine Chance zur Entwicklung regionaler Produktionsstätten und Handwerksbetriebe durch klein- und mittelständische Unternehmen. Seit Jahren bildet der Dachverband Lehm e. V. schon Fachkräfte aus, die dann kompetent und effizient planen, produzieren und verarbeiten. In einem Kreislauf von Produktion, Instandhaltung, Rückbau und Wiederaufbau wird potentielle Arbeitskraft gebunden.

Fachkräfte sorgen für eine breite Information über die technischen Möglichkeiten und vor allem Qualitäten des Baustoffes Lehm. Zusammen wird das Image verbessert, die Akzeptanz von Lehm in der Bevölkerung wird steigen.

Wenn aufgrund der aktuellen politischen Bestrebungen, unsere Gesellschaft zu einem nachhaltigen Wirtschaften und Konsumieren zu bringen, könnten entsprechende Förderungen unterstützend wirken.

Die Verwendung von Lehmstoffen wird vor dem Hintergrund der steigenden Bedrohung durch den Klimawandel und einer bisher zu geringen Zahl an alternativen Maßnahmen eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Dazu sind aktuell und zukünftig folgende Punkte bei der wirtschaftlichen Bewertung zu beachten:

- Wirtschaftlichkeitsberechnungen müssen sich auf relevante Lebens- und Nutzungszyklen von Bauwerken beziehen
- Realitätsnahe Bepreisung der Schadstoffemissionen in Wasser – Boden – Luft muss vorgenommen werden. „Umweltfolgekosten“, bzw. die Kosten, die durch unsachgemäße Eingriffe geschehen, müssen dadurch gedeckt werden können. Im Fokus steht dabei jedoch immer die Unversehrtheit unserer Umwelt als zukünftige Lebensgrundlage
- Sofortige Umstrukturierung von Produktion und Dienstleistung, in Richtung eines nachhaltigen Wirtschaftens. Gerade hier steht eine große Chance für zur Zeit strukturschwache Regionen,
- Anstatt Rückbau und Deponie finden in größerem Maße Lehmbaumstoffe zunehmend Verwendung im Baubereich, auch wenn ihr Marktsegment noch sehr bescheiden ist. Aus dieser Tatsache und vor dem Hintergrund des bedrohlich zunehmenden Klimawandels sollten zuversichtlich und rasch weitere Anwendungsbereiche erprobt und erschlossen werden.

Dies betrifft vor allem den Innenausbau, hier die Herstellung von großformatigen Elementen oder Platten mit Stampflehm oder gar Wellerlehm. Durch Vorfertigung können die notwendigen Trocknungszeiten zu den Produktionsbetrieben verlagert werden, die eigentlichen Bauzeiten werden deutlich verkürzt und somit konkurrenzfähig zu denen mit konventionellen Verfahren.

Eine neue Betrachtungsweise der Lebenszyklen von Baustoffen und -elementen zusammen mit einer entsprechenden Umverteilung der sogenannten „Umweltfolgekosten“ würde sich auch auf das gesamte Primärkostengefüge in der Bauwirtschaft auswirken.

Die schnelle Entwicklung neuer, nachhaltiger, ressourcen- und emissionsparender Lehmbauprodukte ist also ein Gebot der Stunde.

14.5.3. Marktanalyse Lehmblöcke

Text von Inken Bork, Studentin Bauingenieurwesen an der TH Lübeck

Die Nachfrage nach ökologischen Baustoffen steigt seit Jahren an¹². Mit dem Potential von nachhaltigen, ökologischen Baustoffen, wird zunehmend das Potential des Baustoffes Lehm erkannt. Die Herstellung von Bauteilen aus Lehm ist allerdings immer noch zeitaufwändig und von handwerklichen Tätigkeiten geprägt.

Im Hochbau ist generell zu beobachten, dass die Abläufe in den letzten Jahrzehnten immer weiter industrialisiert wurden. So konnte der Bauablauf deutlich verkürzt werden. Dies ist aufgrund der Tatsache, dass die Baumaterialien im Gegensatz zum Lohn an Wert verloren haben.

Der Baustoff Lehm liegt preislich in der Größenordnung von Beton. Gelingt es also die Arbeitsabläufe zu optimieren, kann der Baustoff Lehm auch aus ökonomischer Sicht mit heute üblicheren Baustoffen mit ähnlichem Anwendungsgebiet mithalten.

Von diesem Standpunkt aus ist die Entwicklung einer Maschine, die den Herstellungsprozess von Wellerlehmblöcken übernimmt, marktauglich. Durch Vorproduktion entfällt die Trocknungszeit im Bauablauf und es wird keine zusätzliche Feuchtigkeit in den Baukörper eingebracht. Dadurch kann die Bauzeit auf ein Maß verkürzt werden, dass heute im Hochbau üblich ist.

Anzudenken wäre die Produktion von Standardelementen in verschiedenen Größen, wie es in der Kalksandstein- oder Porenbetonindustrie üblich ist. Die Elemente sollten sich mit üblichen Hebewerkzeugen versetzen lassen. Zu untersuchen bleibt in diesem Zusammenhang, welche Wandstärken für so gebaute, tragende Wände angesetzt werden können.

¹² Ökologische Nachhaltigkeit in der Bauwirtschaft und die Folgen für Industrie & Handel (Deutschland), B + L Marktdaten GmbH, https://www.bl2020.com/DE/Studies/%C3%96kologische%20Nachhaltigkeit%20in%20der%20Bauwirtschaft%20und%20die%20Folgen%20f%C3%BCr%20Industrie%20_%20Handel%20/p/DF31A41-9CEC-C559-B79BE7A4FAE3AB8/DE, Zugriff am: 23.09.2020, 19:20 Uhr

Auch an verschiedene Lösungen bezüglich der Wärmedämmung kann gedacht werden. Hier kann tragender Lehm mit Leichtlehmplatten kombiniert werden.

Auch im Schallschutz lassen sich die Lehmelemente mit Kalksandsteinelementen vergleichen. Es ist bei entsprechender Wanddicke kein zusätzlicher Schallschutz nötig. Hier fehlen zum jetzigen Zeitpunkt allerdings Forschungsergebnisse, um die Wanddicken für die verschiedenen Anforderungen festzulegen.

Bleibt der Lehm im Innenraum unverkleidet oder wird mit einem Lehmputz verputzt, hat dies eine positive Auswirkung auf das Raumklima. Da das Material Lehm nicht hergestellt werden muss und sich zu 100% recyceln lässt, ist die Energiebilanz und ‚graue Energie‘ im Vergleich zu anderen Baustoffen gering.

Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass bei der Kombination aus Lehm und Holz keine holzabdichtenden Maßnahmen an den Kontaktstellen getroffen werden müssen (Bitumen, etc...), da bei Lehm davon auszugehen ist, dass sich im Lehm die gleiche Ausgleichsfeuchte einstellt, wie in der übrigen Umgebung. Das Holz wird also nicht durch die Lehmfeuchte beeinflusst.

Fazit

Abschließend kann gesagt werden, dass der Baustoff Lehm Marktpotenzial hat, wenn bautechnologische Weiterentwicklung ihn maschinell verarbeitbar macht.

Teil V: Bewertung des Projekts

Partizipation – Akzeptanz – Prozess – Ingenieurskunst – zeitgenössische Kunst – Baukultur – Ästhetik – Biosphärenreservat – Lehmbautechnik-Systeme – Hochbau – Rückkopplungseffekte – Nachhaltigkeitsziele – Bildung und Ausbildung

Verkehrsbauwerke stellen ein wichtiges Thema der urbanen und landschaftlichen Baukultur dar. Sie sind umfangreich, buchstäblich einschneidend und dadurch landschaftsprägend. Trotz ihres primär utilitären Charakters spielen ästhetische und technologische Aspekte und Neuerungen eine äußerst prägnante Rolle in der Baukultur und Ausgestaltung der von Menschen geprägten Umwelt. Lärmschutzwände fallen da fast ausschließlich negativ auf; sie sind quasi als notwendiges Übel konzipiert und stellen in vielen Fällen ästhetische ‚Schandmale‘ dar, die allein wegen ihrer akustischen Schutzfunktion in Kauf genommen werden.

Der Bau einer Lärmschutzwand in moderner Lehmbautechnik an der Autobahn A14 würde darauf abzielen, neben ihrer Primärfunktion – Schallschutz – einerseits direkte ökologische Kompensationsmaßnahmen zu beherbergen und ästhetisch möglichst naturnah in Erscheinung zu treten. Andererseits zielt ein solcherweise konzipiertes Bauwerk darauf ab, im Sinne der Ökobilanz und der Nachhaltigkeit auch langfristige Bestreben zu befördern, die dem Klimawandel entgegenwirken, aber auch regionale Dynamik zu entwickeln und lokal ansässige Kräfte zu stärken. Im Zusammenspiel von Tradition und Modernität, Wirtschaft und Natur kann damit eine wahrscheinlich zukunftsweisende Bauweise erprobt werden.

Das Miteinander der Menschen am Ort, der Kultur, der Landschaft und die Baukultur wird im Prozess als erweiterbares komplexes System von Erfindungen, Ideen, Beiträgen und Verabredungen betrachtet. Die Funktion der künstlerischen Prozessbegleitung liegt darin, die Idee, bzw. das Vorhaben in der Gesamtheit im Blick zu haben und darzustellen.

Bei der Konzeption der Maßnahmen haben wir neben effektivem Lärmschutz, technischer Realisierbarkeit, Dauerhaftigkeit und ökonomischer Aspekte auch verschiedene andere Aspekte berücksichtigt, um das Bauwerk in der innovativen Nutzung eines traditionellen, natürlich vor Ort vorkommenden Baustoffes und den damit zusammenhängenden positiven Rückkopplungseffekten auf das Biosphärenreservat und die dort angesiedelten gefährdeten Arten, sowie der regionalen Wirtschaft und Kultur gerecht zu werden.

Ein signifikanter Aspekt des hier vorgestellten Projekts liegt in dem bereits erwähnten, zugrundeliegenden partizipativen, initial ergebnisoffenen Entwicklungs- und Planungsprozess. Auf diese Weise war es möglich, besondere Akzeptanz der örtlichen Bevölkerung und rege, aktive Beteiligung diverser Akteure aus Wirtschaft und Bildungseinrichtungen der Region zu erreichen.

Da die Materialstruktur der örtlichen Lehmvorkommen, wie auch die regionale Tradition eher Wellerlehm als Stampflehm favorisieren, und um neben der bereits existierenden und großtechnisch anwendbaren, maschinellen Fertigung großer Stampflehm-Bauelemente auch Wellerlehmtechnik in großem Maßstab anwendbar zu machen, haben wir Schritte unternommen, um mit regionalen Partnern und der TH Lübeck eine Großpresse für die Produktion von Wellerlehm-Bauelementen zu entwickeln. Erste Tests mit einer eigens angefertigten, hydraulischen Presse im Circa-Maßstab 1:4 sind sehr vielversprechend verlaufen und haben wertvolle praktische Erkenntnisse erbracht.

Die Lärmlehmschutzwand ist eine Möglichkeit zu zeigen und zu erforschen, wie unter Verfolgung der Nachhaltigkeitsziele ein großes Infrastrukturprojekt (Bau der A14) in einer weitestgehend intakten, naturnahen Agrarlandschaft begleitet und die beeinträchtigenden Auswirkungen minimiert werden können. Die Forschungs- und Monitoringaufgabe von UNESCO-Biosphärenreservaten –, in diesem Fall des unmittelbar benachbarten Biosphärenreservats Flusslandschaft Elbe-Brandenburg, kann ein derartiges Projekt unter biologischen und ökologischen Gesichtspunkten langfristig beobachten, erforschen und überwachen.

15. Prozess

15.1. Partizipation

Infrastrukturentscheidungen und Bauvorhaben sind in unseren Augen – durch ihre Einbettung in Globalisierungsprozesse und Klimaveränderung – Bereiche, in denen auch bei bester Planung die weiteren Entwicklungen nicht vorhersehbar sind.

Die Konzeptentwicklung im vorliegenden Projekt zeigt das Potenzial einer besonderen Zusammenarbeit für komplexe und anspruchsvolle Fragestellungen. Die Ideenentwicklung beginnt immer von innen, d.h. mit den Kindern, Jugendlichen und Nachbar*innen aller Altersgruppen vor Ort. Diese kennen die Situation und sind an nachhaltigen, konstruktiven Lösungen interessiert. Alle weiteren Akteure kommen in einem zweiten Schritt hinzu. Während aller Phasen sind Nachbar*innen, Ortsbeirat, lokale und überregionale Unternehmer*innen, Politik und Fachleute bei Feinabstimmungen involviert.

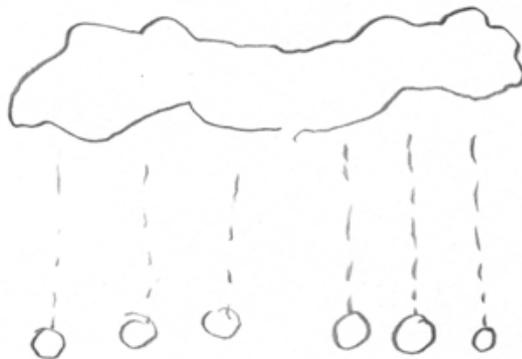


Abb. 95 „Alhambra planen“; Zeichnung von Ute Reeh, 2020

Wir begreifen den Bau dieser Lehmlärmschutzwand nicht lediglich als „nachhaltige“ Baumaßnahme, sondern als politische Handlung. Als solche setzt sie an der Schnittstelle wissenschaftlicher, technologischer und künstlerischer Methoden neue Maßstäbe für ergebnisoffene und partizipative Planungsvorgänge. Dabei werden Bedenken der Beteiligten als Katalysator für technologische Weiterentwicklungen und konstruktives Zusammenarbeiten in alle Richtungen verfolgt. Durch den Entwicklungsprozess in und mit der Region erzeugt diese Vorgehensweise positive Rückkopplungseffekte für Wirtschaft und soziales Miteinander.

Durch den partizipativen Planungs- und Entstehungsprozess wächst nicht nur die Akzeptanz in der Region: Das Bauprojekt zeichnet darüber hinaus die Region über Landes- und Bundesgrenzen hinweg für ein zukunftsweisendes Modell von Naturschutz, Innovation und Kunst aus. Durch die Tatsache, dass bei der Ideenentwicklung von Anfang an Kinder der Region und Bildungseinrichtungen beteiligt waren, konnten unterschiedlichste Interessensgruppen miteinander verbunden werden. Es wurde auf eine natürliche Art und Weise deutlich, dass es um Zukunft geht.

15.2. Ingenieurskunst – Ein Seitenblick

Text von Peter Köddermann, Geschäftsführer Baukultur Nordrhein-Westfalen

Die Welt, in der wir leben, ist abhängig von Ingenieurleistungen. Die Komplexität unseres Zusammenlebens fußt auf Innovationen von Ingenieuren sehr unterschiedlicher Profession. Ernährung,

Energie, Sicherheit und Schutz oder auch Entsorgung und Recycling, es gibt keine grundlegende gesellschaftliche Erwartung mehr, die nicht von Ingenieuren zu erfüllen sein soll.

Die Mechanismen unseres Zusammenlebens werden immer komplexer, gleichzeitig die Anforderungen an das Ingenieurwesen immer vielfältiger. Wir fordern Infrastruktur und Mobilität und digitale Formen der Kommunikation bestimmen unseren Alltag mit. Wir erwarten Architekturen, die uns bezahlbaren Raum zum Leben geben, unser ästhetisches Empfinden befriedigen und möglichst komfortabel gestaltet sind.

Umweltverschmutzung und veränderte Klimabedingungen einerseits und der fortwährende Verbrauch endlicher Ressourcen andererseits, verändern immer fundamentaler die Rahmenbedingungen des Lebens und des Zusammenlebens. Längst reicht es nicht mehr aus, Räume oder Techniken für eindimensionale Funktionen zu entwickeln. Multifunktionalität und Systemvernetzung stehen im Fokus aktueller Forschung, sind grundlegende Aufgaben eines Ingenieurs. Dabei müssen funktionale und konstruktive Ideen verbunden sein mit ökologischen Aufgaben und ökonomischen Möglichkeiten.

So wie in unserem Alltagsverständnis, wird auch im Ingenieurwesen der Wert einer Innovation immer häufiger an seiner Nachhaltigkeit gemessen. Dies gilt auch für unsere gebaute Umwelt. Konzept, Materialität, Effekt sind besonders eng verknüpft mit Funktion und gestalterischer Formensprache. Berechnungen umfassen nicht mehr nur die Umsetzung einer Ingenieuraufgabe bis zur Realisierung, sondern sind auch auf Nutzungszeiträume, Wiederverwendbarkeit und Rückbau gerichtet. Das technisch Machbare ist heute wieder enger verbunden mit dem natürlich Nachhaltigen. Gerade hier entdecken viele Ingenieure neue Möglichkeiten natürlich viele Funktionen zu ermöglichen.

Die Verknüpfung von Frage und Antwort, von gesellschaftlicher Aufgabe und ingenieurtechnischem Ergebnis war die vergangenen 200 Jahre häufig der zentrale Impuls, das Ingenieurkunst überhaupt entstehen konnte. Heute liegt ein Wesenskern der Ingenieurkunst in der Berücksichtigung besonders vieler Determinanten, dem Verständnis für natürliche Prinzipien und einer möglich allumfassenden Analyse bereits bei der Ideenentwicklung.

15.3. Die Rolle zeitgenössischer Kunst

Künstlerische Arbeit leistet die Übersetzung in eine Formensprache die das intuitive Begreifen ermöglicht. Sie stellt dort kommunikative Verknüpfungen her, wo es technische und wissenschaftliche Arbeit nicht kann.



Abb. 96 Soziale Struktur und unverbundener Raum; Zeichnung von Ute Reeh, 2020

Bildende Kunst geht nicht nur einher mit allgemeinen wissenschaftlichen, technologischen, kulturellen und politischen Entwicklungen, sondern kann dank schöpferischer Freiheit oft neue Entwicklungen anstoßen, eine Vorreiterrolle einnehmen und gesellschaftlich wirken. Dabei wäre es zu kurz gedacht, lediglich Kunstrichtungen mit Nähe zu angewandter Kunst anzuerkennen, die für andere kreative Domänen wie Design und Architektur einen Nährboden boten (typische Beispiele sind der russische Konstruktivismus und das Bauhaus. Selbst Grafiken und Malerei (z.B. spätes 19. Jh. Impressionismus, frühes 20. Jh. Expressionismus) oder – als neueres Medium – Installationen (z.B. die des Videokünstlers Nam June Paik) wirken innovativ auf andere Domänen menschlicher Kreativität und Erkenntnis zurück – und dazu zählen auch Technik und Wissenschaft.

Wau Holland, ein Gründer des Chaos Computer Clubs, prägte die Formulierung: „Ein Hacker ist jemand, der versucht einen Weg zu finden, wie man mit einer Kaffeemaschine Toast zubereiten kann“. Zeitgenössische, experimentelle Kunst erkundet Bereiche, die jenseits des Machbaren zu liegen scheinen. Unser Vorhaben ist beispielhaft für Innovationen, deren Basis es ist, das Miteinander von Menschen vor Ort, Kultur, Landschaft und Baukultur als erweiterbares komplexes System von Erfindungen, Ideen, Beiträgen und Verabredungen zu sehen, welche von extrem unterschiedlichen sozialen Gruppen mitgestaltet und ständig verändert werden können. Die Funktion der künstlerischen Prozessbegleitung liegt darin, die Idee/das Vorhaben in der Gesamtheit im Blick zu haben und darzustellen.

15.4. Lärmschutz ist Baukultur

Text von Petra Kind, Baukulturinitiative Brandenburg bei der Bundesstiftung Baukultur

Die Gestaltung von Verkehrsbauwerken ist ein zentrales Thema der Baukultur. Bauwerke des Lärmschutzes an Autobahnen, die bisher meist ohne Ortsbezug und mit nur geringen ästhetischen Ansprüchen entstanden sind, erfordern eine neue Betrachtungsweise. Hierfür ist die Lärmschutzwand aus Lehm, die als Probeausführung in Nebelin in der Prignitz im Juni 2020 gezeigt wurde, ein wegweisendes und zukunftssträchtiges Projekt.

Ausgangspunkt des Projekts war die Zusammenarbeit der Bürgerinitiative mit dem Zentrum für Peripherie und damit einhergehend die Partizipation mit den vor Ort lebenden Bürgerinnen und Bürgern sowie Fachleuten, die eine professionelle Umsetzung und damit eine nachhaltige Umsetzung ermöglichen.

Die Lage im Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe unterstreicht, wie wichtig es ist, Umweltverschmutzung durch Lärm mit sensibel durchdachten Schutzmaßnahmen zu entgegenen. Die Architektur und Ingenieurbaukunst, die hier mit der Technik der Lehmstampf- und Wellerbauweise angewendet wird, spricht eine alte Handwerkstechnik an, die zudem statische Sicherheit für das Bauwerk gewährt. Die Materialseitigkeit des Lehms und der handwerkliche Aufbau der Wand garantieren Ästhetik, Individualität und Ortverbundenheit. Als aktive Ressourcennutzung und Lärmminimierung trägt das Bauwerk zur Resilienz bei.

Die Kombination und Vielschichtigkeit der Lärmschutzwand schlägt damit eine Brücke von der traditionellen Handwerkstechnik hin zu dem modernen Verkehrsproblem Lärmschutz. In ihrer Funktion als Lärmschutz und gleichzeitig als vertikale Naturschutzmaßnahme birgt die Wand in der Prignitz das Potenzial zu einem europäischen Vorzeigeprojekt der Baukultur.

16. Abschließende Bewertung

Die Vorteile einer Lehmlärmschutzwand gegenüber einer herkömmlichen Lärmschutzwand bestehen im Wesentlichen darin, dass das Material nachhaltig und natürlich ist und direkt vor Ort vorkommt. Dies schlägt sich auch in den vergleichenden Berechnungen zur Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus (LCA) nieder. Die Entsorgung des größten Anteils des Wandvolumens kann durch Einebnen vor Ort geschehen, da das Rohmaterial natürliches Bodenmaterial darstellt, ungiftig ist und zudem im Regelfall von vor Ort stammt. Einen weiteren Vorteil stellt die naturnahe Ästhetik dar.

Diese Vorteile werden durch spezielle Maßnahmen (Bienenlehm, Bienensteine, u.U. Schilf, Fledermaus-Nischen, Zickzack-Form) weiter in ökologischem Sinn optimiert, so dass dieses Produkt eine besondere Lebensqualität für bestimmte Arten hat, von denen manche als gefährdet klassifiziert sind.

Nachteilig gegenüber konventionellen Beton- oder Komposit-Lärmschutzwänden ist die Tatsache, dass die lehmbautechnischen Verfahren für Großbauten im Maßstab einer Lärmschutzwand – je nach Variante – entweder relativ neu sind und auf dem Markt wenig präsent (Stampflehm), oder dass die Technologie für großtechnische Vorfertigung noch nicht entwickelt ist (Wellerlehm). Dies führt derzeit voraussichtlich zu einer Verteuerung gegenüber konventionellen Lärmschutzlösungen, obwohl aufgrund der Energiebilanz und der Rohmaterialkosten Lehmlärmschutzwände deutlich besser abschneiden.

16.1. Bautechnik

16.1.1. Entwicklung marktreifer Lehmbautechnik-Systeme für den Hochbau

Zur Zeit arbeitet die Firma *Lehm Ton Erde Baukunst GmbH* in Partnerschaft mit *GBD Lab GmbH* in Dornbirn an einem zweijährigen Forschungsprojekt für die Entwicklung eines marktreifen Bausystems aus vorgefertigten Stampflehmfertigteilen, die auch tragende und dämmende Funktionen (Fassade) übernehmen können. Das Bauen mit Stampflehm soll selbstverständlicher und die Realisierung von Lehmbaukonstruktionen auch im urbanen Raum erleichtert werden.

16.1.1.1. Druckfestigkeit bei Baumaterialien

Mit dem üblicherweise verwendeten Beton schießt man in manchen Bereichen quasi mit Kanonen auf Spatzen. Mit entsprechenden Wandstärken können Konstruktionen aus voll recyclingfähigem Massivlehm wie Wellerlehm oder Stampflehm auch im mittelstark belasteten Bereich genutzt werden und dort Beton ersetzen.

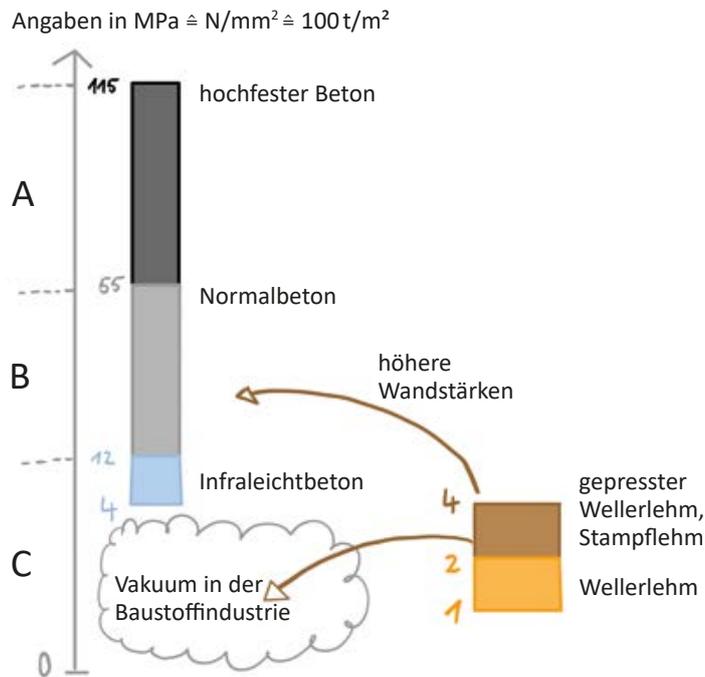


Abb. 97 Anwendungsbereiche für Materialfestigkeiten: (A) Hochleistungskonstruktionen (z. B. Talsperren, Tunnel), (B) Mittel- und hochbelastete Konstruktionen (z. B. Brücken), (C) Wenig belastete Konstruktionen (z. B. Hallen, Lärmschutz). Skizze Max Dombrowski, TU Berlin, Fachgebiet Massivbau

Lärmschutzwand in Wellerlehmtechnik

Für die Probewand in Nebelin haben wir eine Methode entwickelt, große Mengen Wellerlehm in kurzer Zeit herzustellen und große Wellerblöcke vorzufertigen und zu trocknen. Diese Tests waren sehr erfolgreich. Die Herstellung von großen Wellerlehmblöcken ist eine Neuerung, die umfangreiche Bauvorhaben in Wellerlehmbauweise möglich macht. Momentan arbeitet unser Team an Tests zur Entwicklung einer maschinellen Vorfertigung von Wellerlehmblöcken.

Die Wellerblöcke lassen sich problemlos per LKW transportieren und per Radlader oder Kran versetzen. An der Probewand in Nebelin wurden vorgefertigte Wellerelemente als auch ein Bereich mit traditioneller Wellertechnik eingebaut.

Für die Bearbeitung des frischen sowie des trockenen Lehms wurde eine Mauerwerkssäge erfolgreich modifiziert und es wurden Sägeversuche ausgeführt. Das Sägen von Wellerlehmblöcken stellt eine logistische Erweiterung der Vorfertigung von Wellerlehmblöcken dar, die dadurch einfach und genau auf ein bestimmtes Maß zugesägt werden können.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Grundlagen für eine Erstellung einer Wand in Lehmwellerbauweise in zukünftiger Größe geschaffen wurden. Nächster Entwicklungsschritt ist die großtechnische Vorfertigung und Versetzung von Wellerlehmblöcken. Das Verfahren würde einen großen Synergieeffekt auf die örtliche Bauindustrie sowie auf die Anwendung von Lehm- bauprodukten insgesamt auslösen.

16.2. Fazit und Darstellung der Relevanz aus der Sicht des Biosphärenreservates Flusslandschaft Elbe

Text von Dr. Heike Ellner, Leiterin des Biosphärenreservats Flusslandschaft Elbe-Brandenburg

Biosphärenreservate sind Modellregionen für ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit. Hier werden das Zusammenleben und-wirken von Mensch und Natur erprobt und Kulturland

geschützt. Die Errichtung einer Lärmlehmschutzwand im Zuge des Baus der A14 an der Biosphärenregion entspricht voll und ganz den Intentionen von UNESCO-Biosphärenreservaten.

Gute Argumente – angelehnt an die 17 Nachhaltigkeitsziele zu denen sich die Bundesregierung bekannt hat – dafür sind:

1. Die Lärmlehmschutzwand schützt in einer bisher sehr ruhigen, naturbelassenen Region die Anwohner vor Lärm. (SDG Ziel 3)
2. Die Lärmlehmschutzwand verwendet regionale, naturnahe Baustoffe. Diese sind recyclingfähig, wiederverwendbar und ohne schädliche Emissionen. (SDG Ziel 12)
3. Die Lärmlehmschutzwand bietet Insekten als auch anderen geschützten Arten einen wertvollen Lebensraum. (SDG Ziel 15)
Der Einbau von sog. Insektenhotels an der Modellwand vor der KITA Nebelin zeigt, wie gut sich der Baustoff Lehm mit einem aktiven Insektenschutz kombinieren lässt, in dem Nist-, Aufenthalts- und Überwinterungsangebote für diverse Insektenarten geschaffen werden. Durch den Bau der A14 wird der Lebensraum von mehreren Natura 2000 Arten wie Fledermäusen (Großes und Kleines Mausohr) beeinträchtigt. Der Bau von Lehmwänden wäre auch als Ablenkeinrichtungen für Fledermäuse ein denkbarer Einsatz.
4. Der Bau einer Lärmlehmschutzwand stärkt die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der in der Region ansässigen Unternehmen, die eine hohe Fachkompetenz im Lehmabbau haben. Die Innovationsfähigkeit von Handwerksbetrieben und mittleren Unternehmen wird durch die Kooperation mit den begleitenden wissenschaftlichen Einrichtungen (TU Berlin, TH Lüneburg, Bundesanstalt für Straßenwesen) gestärkt. (SDG Ziel 9)
5. Der Bau der Lärmlehmschutzwand steht für ein partnerschaftliches Miteinander in der Region, die Mitwirkung der KITA und Schulen aus Wittenberge und Perleberg zeigt auch ein generationsübergreifendes Miteinander zum Wohle der Region. (SDG Ziel 17)
6. Die Lärmlehmschutzwand greift ein identitätsstiftendes Merkmal unserer Kultur- und Naturlandschaft auf: die Baukultur. In den Dörfern und kleinen Städten prägen regionaltypische Haus- und Hofformen das Erscheinungsbild und tragen mit ihren roten Ziegelsteinen – gebrannt aus Auenlehm – zum Charakter der Landschaft bei. Dies zu erhalten und weiterhin in Wert zu setzen ist Anliegen einer breiten Öffentlichkeit. Die Lehmwand setzt diese Baukultur mit den Eigenschaften einer ökologischen Schallschutzeinrichtung in innovativer Weise um.

Die Lärmlehmschutzwand ist eine gute Gelegenheit, um zu zeigen, wie unter Verfolgung der Nachhaltigkeitsziele ein großes Infrastrukturprojekt (Bau der A14) in einer weitestgehend unzerschnittenen, naturnahen Landschaft begleitet und die beeinträchtigenden Auswirkungen minimiert werden. Die Modellfunktion von Biosphärenreservaten unterstützt ein derartiges Projekt und sichert auch dessen langfristige Begleitung. (Forschungs- und Monitoringaufgabe von UNESCO-Biosphärenreservaten).

17. Umsetzung der Projektidee

17.1. Prototyp und Pilotvorhaben an der A14 in Nebelin

Das Pilotprojekt „Alhambra Brandenburgs“ bietet aus Sicht der BAST die Möglichkeit, eine Bauweise am Beispiel eines Infrastrukturprojektes wissenschaftlich zu begleiten, die so naturverträglich wie möglich die verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Schutzgüter integriert. Die Verbindung von Lärmschutz, Landschaftsschutz, Naturschutz und Ressourcenschonung – die Nutzung von Boden als Baumaterial, auch für das Raststättengebäude – anstatt ihn als Abfall zu behandeln: Auf ein Pilotprojekt mit diesen Qualitäten hat die BAST lange gewartet, und setzt sich aufgrund der interessanten Untersuchungsmöglichkeiten für die Realisierung ein.

(Dr. Birgit Kocher, LRDir Dirk Heuzeroth, Abt. Umweltschutz, Bundesanstalt für Straßenbau)

Gesellschaftspolitischer Kern des Anliegens ist die Ideenentwicklung zusammen mit den Menschen vor Ort und den Spezialisten. Das Einbeziehen der ansässigen Akteure stärkt die regionale Wertschöpfung und befördert eine Vorreiterrolle, der strukturschwachen Region im Bereich nachhaltigen Bauens.

Die Lage im Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe unterstreicht, wie wichtig es ist, Umweltverschmutzung durch Lärm mit sensibel durchdachten Schutzmaßnahmen zu entgegnen. Architektur und Ingenieurbaukunst, wird auf die Höhe der Zeit weiterentwickelter Lehmbautechnik angewendet und nutzt damit eine alte Handwerkstechnik, die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit gewährt. Die Materialsichtigkeit des Lehms und der handwerkliche Aufbau der Wand garantieren Ästhetik, Individualität und Ortsverbundenheit. Als aktive Ressourcennutzung und Lärmminimierung trägt das Bauwerk zur ökologischen und sozialen Resilienz bei.

Die „Alhambra Brandenburgs“ in der Prignitz hat das Potenzial zu einem europäischen Vorzeigeprojekt für Baukultur, Klima- und Umweltschutz. (Textbeitrag Baukulturinitiative BB)

Ziel ist es, einen Prototyp der entwickelten Lehmwand im vorgeschriebenen Bereich bei Nebelin zu errichten. Ziel des Biosphärenreservats und der Bundesanstalt für Straßenbau ist es darüber hinaus, die Raststätte mit einem weiteren Prototypen zu ummanteln, der u.a. Fledermäusen und Insekten Unterschlupf bietet.

Pflichtteil und Pilotprojekt

Im Verlauf der Erarbeitung der vorliegenden Machbarkeitsstudie hatte sich in Gesprächen mit der BAST der Vorschlag herauskristallisiert, den projektierten Pflicht-Lärmschutz für die Nebeliner „Siedlung an der Bahn“ in Länge von 568 m als Stampflehm-Trägerwand (Konzept Abschnitt B; siehe Abb. 3 auf Seite 22; Bauweise siehe Zeichnungen Abb. A1 bis Abb. A6 ab Seite 193) auszuführen. Nach momentanem Stand besteht das Bundesministerium für Digitales und Verkehr jedoch darauf, hier bei einer konventionellen Lösung zu bleiben, um Klagen welcher Art auch immer zu vermeiden. Es besteht jedoch eine große Offenheit dafür, unsere übrigen Vorschläge ganz oder in Teilen vor Ort zu errichten und langfristig zu erforschen.

Die in unserem Konzept zusätzlich vorgesehenen Lärmschutzabschnitte (Abschnitte A, C, D, E) konzipieren wir als Pilotvorhaben und Forschungsprojekt für die Bautechniken Schwerlast-Stampflehmwand und Schwerlast-Wellerlehmwand.

Die zusätzlich zum projektierten Pflicht-Lärmschutz als Prototypen vorgeschlagenen Bauabschnitte A, D, E (Schwerlastwand Wellerlehm) und C (Schwerlastwand Stampflehm) sollen neben ihrer direkten Funktion der Verbesserung des Lärm-, Natur- und Landschaftsschutzes für das Dorf Nebelin durch langfristiges Monitoring weitere Erkenntnisse zur Schallschutzwirkung, zur Besiedelung, der Wirkung als Trittsteinbiotop, etc. liefern.

17.2. Weiterführendes Konzept „Brandenburgs Alhambra“

Aus den Studien und Arbeiten zur vorliegenden Machbarkeitsstudie haben sich Ideen und Entwürfe für ein weiterführendes Konzept entwickelt und kristallisiert. Der plakative Titel „Brandenburgs Alhambra“ wurde in Anlehnung an die bis zu 20 Meter hohe Stampflehm-Umfassungsmauer der Alhambra in Granada, Spanien, als Metapher für Dauerhaftigkeit und Baukultur gewählt. Bei Nebelin ist an der A14 auch eine Raststätte projektiert. Das Konzept „Brandenburgs Alhambra“ integriert nun das Raststättengebäude mit Lärmschutzwand zu einem Lehmbauensemble moderner Lehmbauarchitektur. Es geht dabei auch nicht nur um Bauwerke, sondern auch um ein betriebliches und soziokulturelles Konzept, in dem die Raststätte auch zum verbindenden Ort zur umgebenden Landschaft wird und umgekehrt für die Menschen (Anwohner aber auch beispielsweise Fahrradtouristen) zum Ort für Einkauf und Gastronomie. Auch ein Seminar- bzw. Tagungsraum im Raststättengebäude ist angedacht.

Zugleich sichert dessen Lage am Rande des Biosphärenreservats Elbe-Brandenburg und die direkte Anbindung an die Autobahn A14 die langfristige Begleitung als Forschungs- und Monitoringaufgabe des Biosphärenreservats und der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST. So wird das Wissen über diese Bautechnik erfahrbar und das Fachwissen über ihre Anwendbarkeit, Weiterentwicklung und ökologische Wirkung erweitert.

17.2.1. Ideenfindungsworkshop

Im Januar 2021 wurde in einen hybriden Präsenz- und Online-Ideenfindungs-Workshop in Nebelin ein plakativ ‚Alhambra Brandenburgs‘ genanntes Gedankenmodell skizziert. Dieses stellt einen Bau dar, der Menschen, Landschaft und Natur schützt und innovative und ökonomische Verfahrenstechnik mit zeitgenössischer Formensprache verbindet. Mit einer geplanten Gesamtlänge von etwa 4,2 km entstände das größte zeitgenössische Lehmbau-Ensemble in Europa. Dieser hätte das Potenzial, Lehm als Baustoff der Zukunft zu einem wirtschaftlich relevanten Durchbruch zu verhelfen. Er könnte Vorreiter für ein Miteinander neuer Technologie und nachhaltigen Planens und Bauens werden. Anliegen des Planungsprozesses ist es, deren Grundstrukturen so zu konzipieren, dass ein Miteinander von Innovation im Bau, Lärmschutz, Naturschutz und Naturerleben gelingt.

Der Workshop gründete auf den Vorarbeiten des Forschungsteams Lehmlärmschutz begann mit persönlichen Inputs der Dorfbewohner:innen und der örtlichen Verwaltung. Beteiligt waren die Bundesstiftung Baukultur, das Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe und die Bundesanstalt für Straßenbau. Durch den fließenden Übergang zwischen Vor-Ort-Planung und Online-Meetings wurde die konkrete Arbeit mit Plänen und Modellen immer wieder um den Blick von außen ergänzt. Mittels dieses Formates gelang es eine komplexe und von allen Seiten befürwortete Vision zu entwerfen.



Abb. 98 Bildmontage, die den Verlauf der Autobahn A14 und der Raststätte auf einer Luftaufnahme zeigt. Rot: Lehmwände, die in das Raststättengebäude übergehen. Orange: Leitstrukturen für Menschen. Ocker: Fahrrad- und Fußweg.

Ergebnis des Ideenfindungsworkshops

Das Lehmbauensemble lässt sich von der Autobahnseite sowohl mit dem Individual-, als auch mit dem öffentlichen Fernverkehr erreichen und ist als Tank- und Rastanlage unmittelbar an die Autobahn angegliedert. Von Nebeliner Seite ist es fußläufig und über einen Fahrradweg erreichbar. Dieser soll die Raststätte an das Radwegenetz der Region anschließen und mit den anliegenden Dörfern und dem Biosphärenreservat Flusslandschaft Elbe verknüpfen.

Der regionale Bezug der Rastanlage und ihre Einbettung in die Landschaft werden beim Betreten bereits auf den ersten Blick deutlich und brechen mit dem herkömmlichen Bild der „Raststätte als außerirdischem Ort“ (Rainer Nagel, Bundesstiftung Baukultur), der von seiner Umgebung losgelöst und nur über die Autobahn erreichbar ist. Die Lehmwände fügen sich durch Material und Form in das Landschaftsbild der Prignitz ein.

Autobahn und Raststätte sind 2 m höher gelegen als die umgebende Landschaft. Über einen auf Brüstungshöhe abgesenkten Abschnitt der massiven Lehmwand hinweg fällt der Blick in die Weite der umliegenden Landschaft. Außerhalb von Wand und Raststätte liegt ein Areal, das im ursprünglichen Entwurf als Freifläche im Parkplatzbereich vorgesehen ist. Hier ist es durch das Raststättengebäude hindurch betretbar. Dessen Architektur selbst ergibt sich aus dem Zwischenraum zweier sich überlappenden Enden der Wand und verbindet Rastplatz und Landschaft. Beim Betreten des Gebäudes machen Karten und Livestreams von Webcams aus Fledermaus- und Insektenquartieren die Bedeutung dieses Ortes für das umgebende Ökosystem, die regionale Kultur, die zeitgenössische Baukultur und die Geschichte des Baustoffs deutlich. Die vorzufindende Gastronomie berücksichtigt regionale Spezialitäten; Gastraum und Terrassen sind Orte der Begegnung, in denen sich Reisende wie mit dem Fahrrad angekommene Gäste der Region gleichermaßen aufhalten können. Von hier aus ist das zuvor über die Lehmbrüstung betrachtete Außenareal für Besucher:innen zugänglich.

Tritt man hinaus, ist man von Ruhe umgeben. Die mächtige Lehmwand aus dem Bodenaushub des Autobahnbaus im Rücken, führt ein Rundweg durch verschiedene ökologische Mosaik, die zugleich den in den Lehmwand siedelnden Insekten, Vögeln und Fledermäusen als Nahrungsangebot dienen und durch das Biosphärenreservat betreut und erforscht werden. Holzstege und andere weich integrierte Leitstrukturen tragen dazu bei, dass an diesem Ort die Verschränkung von Ausgleichs- und Erholungsflächen möglich und bewertbar ist. Hier findet sich eine Streuobstwiese, Sitzbänke und Orte für Bewegung und Ruhe, an denen man die Geräusche, Gerüche, Farben und die Besonderheiten der einzelnen Zonen erleben kann.



Abb. 99 Von Links, Maria Pegelow, Brandenburgische Architektenkammer; Julian Latzko, Bundesstiftung Baukultur; Lennart Beckebantze, Universität Hannover; Dr. Dieter Günnewig, Bosch&Partner Hannover; Andreas Hagenguth, Fledermausexperte, Berge. Foto Ute Reeh

chen getrennt von Infrastrukturbauten angelegt, um möglichst natürliche Bedingungen zu schaffen.

Das Konzept für die ‚Alhambra Brandenburgs‘ sieht unter anderem als Ausgleichsfläche eine Grünfläche vor, die sowohl ökologisch wertvolle Wildvegetation aufweist als auch kulturlandschaftliche Elemente. So sollen neben Gebüsch- und Bauminselfen von verschiedenen, in der Prignitz natürlich vorkommenden Gehölzarten, Kräuter, Wildblumen und andere Blühpflanzen wachsen, renaturierte Lehmentnahmehügel entstehen und Obstbäume verschiedener Arten gepflanzt werden.

Einerseits durch die Größe der Fläche, andererseits durch Verhaltensbeeinflussung mittels angelegter Pfade soll gewährleistet sein, dass der Naturbereich von den Besuchern als schöner Ort wertgeschätzt wird. Damit bietet die ökologisch wirksame Ausgleichsfläche den Besuchern der Raststätte Fläche für Erholung, Ruhe und Naturerlebnis.

Der Grünbereich am Rand der Raststätte ist nicht für Hunde zugänglich; dafür sind divers bepflanzte Flächen innerhalb der Raststätte vorgesehen.

17.2.3. Multifunktionalität und Einbettung

Längst reicht es nicht mehr aus, Räume oder Techniken konzeptionell eindimensional für singuläre Funktionen zu entwickeln. Multifunktionalität und Systemvernetzung stehen im Fokus aktueller Forschung und sind grundlegende Aufgaben im Ingenieurwesen. Dabei müssen funktionale und konstruktive Ideen verbunden sein mit ökologischen Aufgaben und ökonomischen Möglichkeiten.¹³

Das Projekt ‚Alhambra Brandenburgs‘ ist als multifunktionales Ensemble konzipiert, das nationale Verkehrsinfrastruktur mit regionalen und lokalen Infrastrukturelementen verbindet und gleichzeitig Dienstleistungs-, Erholungs- und Schutzfunktion hat. Unter den regulatorischen und technischen Vorgaben integriert sich der Bau bestmöglich in die natürliche Umgebung und verwendet für die Hochbauten weitgehend Rohmaterial von Ort und Stelle (grob geschätzt 85 bis 90 Prozent der Baumasse), das darüber hinaus energiesparend verarbeitet wird und vollständig recyclebar ist.

Als öffentlicher, funktionaler Ort gehen urbaner und ländlicher Raum eine Beziehung ein. Es entsteht ein Berührungspunkt, ähnlich einem sogenannten Wurmloch aus der Relativitätstheorie, wo durch die Krümmung der Raumzeit zwei völlig unterschiedliche Orte im Universum miteinander verbunden sind.

17.2.4. Architektur des Raststättengebäudes

Sowohl Martin Rauch, LehmTonErde Baukunst, als auch der Architekt Dipl.-Ing. Arch. BDA Martin Haas (haas cook zemmrich STUDIO2050) nahmen am Ideenfindungsworkshop zu Brandenburgs Alhambra teil und es entstanden dabei im Ideenaustausch und unter Berücksichtigung der Anforderungen erste Gedankenskizzen dazu, wie ein Lehmhaus-Raststättengebäude als integrativer Bestandteil einer Lehmhaus-Lärmschutzlösung konzipiert werden könnte.

13 Auszug aus einem Text von Peter Köddermann, Geschäftsführer der *Baukultur Nordrhein-Westfalen*

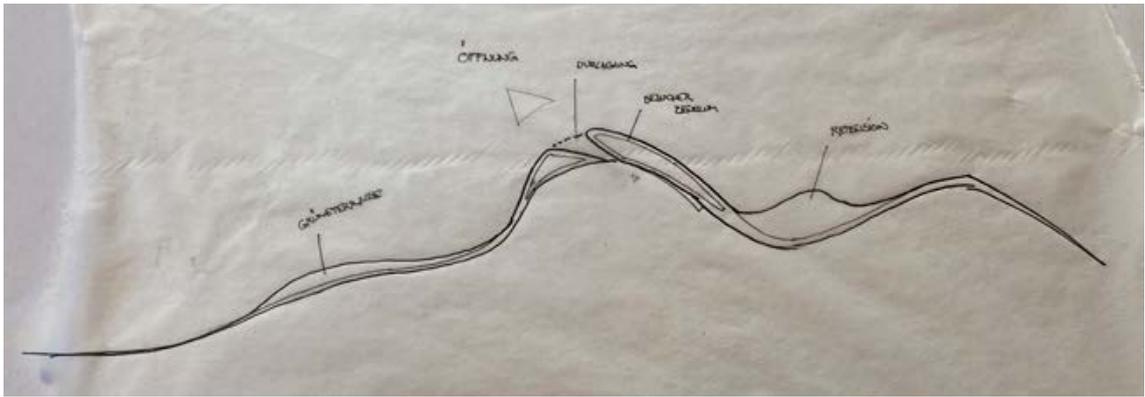


Abb. 102 Ideenskizze des Architekten Martin Haas für das Raststättengebäude

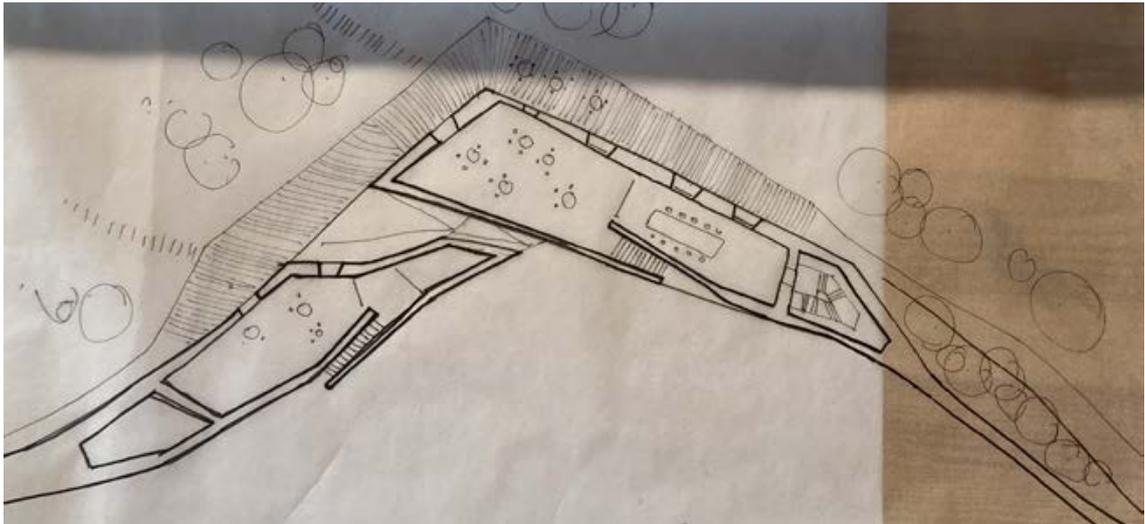


Abb. 103 Ideenskizze des Architekten Martin Haas zum Grundriss und der Funktionalität des Raststättengebäudes

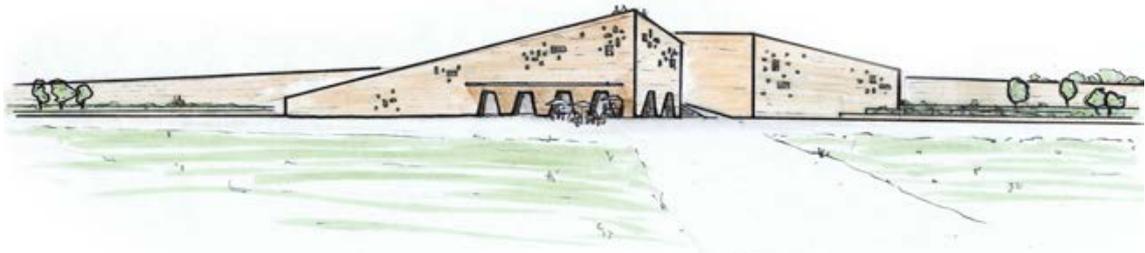


Abb. 104 Skizze des Architekten Martin Haas für das Raststättengebäude, Ansicht von Westen

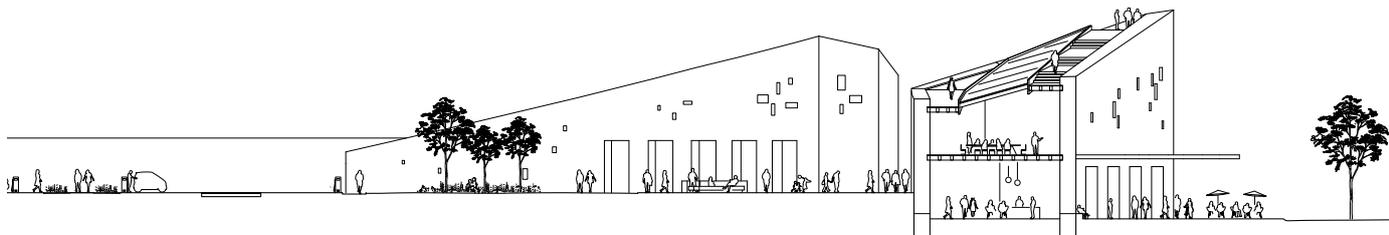


Abb. 105 Schnittzeichnung des südlichen Raststättengebäudes des Lehmabauensembles mit Gasträum, Seminar/Tagungsraum (1. Stock), begehbare Dach/Aussichtsplattform, Außenterrasse. Zeichnung haas cook zemmrich STUDIO2050

17.2.5. Zukunftsvision

„Eine solche massive Lärmschutzwand könnte [der Region und dem Lehm als Baustoff der Zukunft] wirklich einen Push geben. Wenn man ein so starkes Zeichen wie die Lehmlärmschutzwand und die Raststätte mit einer Akademie verbindet, könnte das eine sehr große Strahlkraft entfalten. [...] Baukultur nachhaltig verändern geht nur im Miteinander von Leuchtturmprojekten, Ausbildung und dem Kreieren von Unternehmen die das realisieren können. Das Interesse ist groß, aber es fehlt derzeit an Firmen.“
(Martin Rauch, Lehmbauexperte, Workshop 15.01.2021)

Als Leuchtturmprojekt der zeitgenössischen Baukultur kann das Lehmbauensemble als Impulsgeber für die Schaffung einer regionalen Lehmbauindustrie fungieren und dazu beitragen, gegenwärtige Maßstäbe für Ausgleichsmaßnahmen unter wissenschaftlicher Begleitung neu zu setzen. Durch Einbezug von Forschung und Bildung kann diese Anziehungspunkt für Auszubildende und internationale Spezialisten sein.

In eben diesem strategischen Dreieck aus Leuchtturmprojekt, Lehmbauindustrie und Bildungsstätten werden an diesem Ort Synergien frei, die dem zeitgenössischen Lehmbau in seiner Rolle als Vorreiter einer zukunftsorientierten Baukultur zum Erfolg verhelfen können und als neuer wirtschaftlicher Motor Impulse für die Region zu geben.

„Aus dem gebauten Erbe heraus die Zukunft entwickeln, sich mit der Situation auseinandersetzen, ein ganz besonderes Projekt nach vorne bewegen, [...] dem Menschen folgen können. [...] Personen aus verschiedensten Bereichen offen zusammenarbeiten. „So entsteht Baukultur.“
(Rainer Nagel, Vorstandsvorsitzender der Bundesstiftung Baukultur, 15.01.2021)

17.2.6. Nächste Schritte (geplante Folgeforschung)

- Strategie zur Realisierung des Lehmbauensembles als Pilotprojekt
- Konkretisierung der architektonischen Idee in einem Masterplan, der Landschaft, Lärmschutz, Raststätte, Ausgleichsflächen, Leitstrukturen und ihre Verbindungen sichtbar macht
- Klimarelevanz: präzise Darstellung der Kreislauffähigkeit, der Ressourcenschonung und der CO₂ Bilanzierung
- Weiterentwicklung von Lehmbautechnologie in Zusammenarbeit mit regionalen und überregionalen Akteuren bis hin zur Produktionsreife
- Aufbau eines Unternehmens zur Produktion von Stampflehm- und Wellerlehmfertigteilen
- Mitdenken und Entwicklung von Bauteilen für den Hochbau mit dem Raststättengebäude als Referenz
- Aufbau eines Bildungsnetzwerks im Rahmen der vom Zentrum für Peripherie projektierten Akademie, die in Weiterentwicklung des Bauhauses, Innovation, Handwerk, Bau und Kunst zusammen denkt
- Formulierung neuer, der Zeit angemessenen Bewertungskriterien für Lärmschutz, Ausgleichsmaßnahmen und nachhaltiges Bauen

Anhang

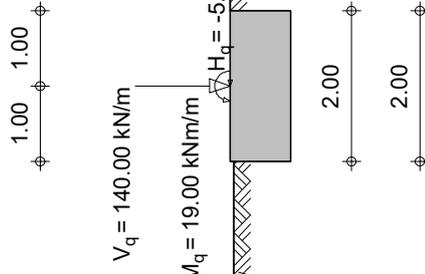
Konstruktion / Vorabmessungen

Siehe Kapitel „5.7. Vordimensionierung“.

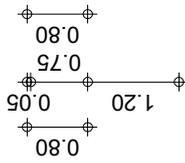
Die Blätter 151 - 156 gehören zu „5.7.1. Gründung Schwerlastwand“ auf Seite 33.

Die Blätter 157 - 182 gehören zu „5.7.2. Gründung Trägerwand“ auf Seite 33.

Die Blätter 183 - 188 gehören zu „5.7.3. Stahlstütze Trägerwand“ auf Seite 33.



Aushub A
 $z = 0.05 \text{ m}$



Auffüllung
 $\varphi/\delta = 30.0^\circ/20.0^\circ$
 $c = 0.0 \text{ kN/m}^2$
 $\gamma/\gamma' = 19.0/10.0 \text{ kN/m}^3$
 $E_s = 20.0 \text{ MN/m}^2$

Geometrie des Unterfangungskörpers

| Punkt | x | z |
|-------|------|------|
| 1 | 2.00 | 0.00 |
| 2 | 2.00 | 0.80 |
| 3 | 0.00 | 0.80 |
| 4 | 0.00 | 0.00 |

Kubatur: 1.60 m³/lfm

Materialparameter des Unterfangungskörpers nach EC 2

Wichte = 25.00 kN/m³, Materialfestigkeit $f_{ck} = 3.50$ MN/m²,

E-Modul = 15000 MN/m², Sicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1.50$, $\alpha_{cc} = 0.70$, $\alpha_{ct} = 0.70$

Lastfall I, Typ BS-P

Erddruckverlauf (char.) ohne Umlagerung [kN/m²]

| Tiefe z | Summe-e _v | e _n -Summe | e _n -Boden+Großfl. | e _n -Auflast |
|---------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.80 | 0.000 | 7.600 | 7.600 | 0.000 |
| 0.80 | 0.000 | 7.600 | 7.600 | 0.000 |
| 100.00 | 0.000 | 950.000 | 950.000 | 0.000 |

Aushub Nr. A

Wand kräftig voll aus
Wandfuß eingespannt

Negativer Erddruck wirkt mit auf das statische System

Keine Umlagerung

Berme vor der Wand: $x_1 = 1.50$ m, $x_2 = 5.10$ m, $dh = 1.95$ m

| Passiver Erddruck | char. Wert | | Bemessungswert |
|--------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Tiefe z [m] | $e_{ph,k}$ [kN/m ²] | Tiefe z [m] | $e_{ph,d}$ [kN/m ²] |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.050 | 0.000 | 0.050 | 0.000 |
| 0.234 | -20.065 | 0.234 | -14.332 |
| 0.800 | -31.460 | 0.800 | -22.471 |
| Summe $E_{ph,k} =$ | -16.426 kN/m | Summe $E_{ph,d} =$ | -11.733 kN/m |

Gesamtlänge der Wand: 0.80 m

Aushubtiefe z = 0.05 m, Einbindetiefe t = 0.75 m, W-Stand = 100.00 m
 $E_d = -11.90$ kN, $E_k = -8.54$ kN

Belastung und Schnittgrößen des Unterfangungskörpers

Charakteristische Schnittgrößen

Alle Werte je m Wand, bezogen auf die Schwerachse

| Tiefe z [m] | Drehbel. m [kNm/m] | Längsbel. n [kN/m] | H-Druck h [kN/m] | Moment M [kNm] | Normalkr. N [kN] | Querkraft Q [kN] | A-H [kN] |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------|
| 0.000 | 0.00 | 50.00 | 0.00 | -19.00 | -140.00 | 0.00 | |
| | | | | | | -5.50 | |
| 0.050 | 0.00 | 50.00 | 0.48 | -19.28 | -142.50 | -5.51 | |
| 0.055 | 0.10 | 49.90 | 0.25 | -19.30 | -142.74 | -5.51 | |
| 0.234 | 3.80 | 46.20 | -8.21 | -19.90 | -151.35 | -4.80 | |
| 0.250 | 3.86 | 46.14 | -8.22 | -19.91 M | -152.09 | -4.67 | |
| 0.497 | 4.80 | 45.20 | -8.46 | -19.75 | -163.36 | -2.61 | |
| 0.800 | 5.95 | 44.05 | -8.76 | -18.51 M | -176.89 | 0.00 | |

Bedeutung: M=max/min-M (Q=0), A=Anker oder Abstützung, B=Bettungsfeder

| | | | | | | | | |
|--------------|------|--------|------|--------|------|-------|------|--------|
| Aushub Nr. A | maxM | -18.51 | zugQ | 0.00, | maxQ | 0.00 | zugM | -19.00 |
| | minM | -19.91 | zugQ | -4.67, | minQ | -5.51 | zugM | -19.30 |
| | maxw | 0.0 mm | | | | | | |

Verformung und Spannungen des Unterfangungskörpers

| Tiefe z [m] | Verformung w [mm] | Wanddicke d [m] | Exzentr. e/d [-] | Druckzone h [m]* | Randspannungen [N/mm ²] | |
|-------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------------|--------------|
| | | | | | σ_1^* | σ_2^* |
| 0.000 | 0.0 | 2.000 | 0.068 | 2.000 | 0.148 | 0.062 |
| 0.050 | 0.0 | 2.000 | 0.068 | 2.000 | 0.150 | 0.063 |
| 0.234 | 0.0 | 2.000 | 0.066 | 2.000 | 0.158 | 0.068 |
| 0.250 | 0.0 | 2.000 | 0.065 | 2.000 | 0.158 | 0.068 |
| 0.497 | 0.0 | 2.000 | 0.060 | 2.000 | 0.166 | 0.076 |
| 0.800 | 0.0 | 2.000 | 0.052 | 2.000 | 0.172 | 0.088 |

σ^*) Maßg. Wert aus Bemessung mit char. und Bemessungsschnittgrößen

Die Bemessung des Betons wurde nach DIN EN 1992 durchgeführt

Max. $\sigma = 0.172$ N/mm², max. e/d = 0.068, min. e/d = 0.052

Spannungen berechnet nach Zulassung 1997 (linear).

Nachweis der Schubspannungen

| Tiefe z [m] | Querkraft Q _d [kN] | Druckzone h [m] | Schubspannung τ _{cp} [N/mm ²] | Schubwiderst. f _{cvd} [N/mm ²] |
|----------------|----------------------------------|--------------------|---|--|
| 0.000 | -8.25 | 2.000 | 0.006 | 0.251 |
| 0.050 | -8.26 | 2.000 | 0.006 | 0.251 |
| 0.234 | -7.24 | 2.000 | 0.005 | 0.253 |
| 0.250 | -7.06 | 2.000 | 0.005 | 0.253 |
| 0.497 | -4.08 | 2.000 | 0.003 | 0.254 |
| | -3.91 | 2.000 | 0.003 | 0.254 |
| 0.800 | 0.00 | 2.000 | 0.000 | 0.256 |

Max. τ_{cp} = 0.006 N/mm²

e_{vorh} = 0.105 m < e_{zul} = 0.167*d = 0.334 m

Schnittgrößen in der Sohlfuge (char.):

| | | | | | | |
|----------------|--------------------|-------------|--------------------|------------------------|-----|---------|
| | M = | -18.51 kNm, | V = | -176.89 kN, | H = | 0.00 kN |
| Bodenpressung: | d = | 2.00 m, | e = | 0.11 m, | x = | 2.00 m |
| (Bemess.werte) | σ _{1,d} = | 172.2, | σ _{2,d} = | 87.6 kN/m ² | | |

Die zul. Bodenpressung = 250.0 kN/m² ist eingehalten.

Nachweis der Gleitsicherheit

H_d = 11.90 kN
R_d + R_{p,d} = V * tan(φ) / γ_{R,h} + R_{p,d} =
= 180.00 * 0.577 / 1.100 + 9.70 = 104.18

(R_{p,d} mit δ_p=0 ermittelt)
V = 176.89 kN (V-Kraft Sohlfuge)
+ 3.11 kN (mob. E_{pvk} = 0.520 * 5.98)
- 0.00 kN (E_{pvk}, mit δ_p=0 ermittelt)

H_d / (R_d + R_{p,d}) = 11.90 / 104.18 = 0.11 < 1.0

*** Nachweis erfüllt ***

Nachweis der Grundbruchsicherheit

Böschungsneigung β [Grad] (verändert, siehe Hinweis) = 23.83
Einbindetiefe t [m] = 0.75
Ersatzeinbindetiefe d' [m] = 1.28

Ersatzbreite b' [m] = 1.76

Neigung der Resultierenden tan(δ_s) = H_k / V_k
= 1.75 kN / 180.00 kN = 0.01

H_k = -0.00 kN (H-Kraft Sohlfuge)
+ 8.54 kN (mob. E_{phk} = 0.520 * 16.43)
- 6.79 kN (0.500 * E_{phk}, mit δ_p=0 ermittelt)

V_k = 176.89 kN (V-Kraft Sohlfuge)
+ 3.11 kN (mob. E_{pvk} = 0.520 * 5.98)
- 0.00 kN (0.500 * E_{pvk}, mit δ_p=0 ermittelt)

Maßgebende Bodenkennwerte:
γ oberhalb Gründungssohle = 19.00
γ unterhalb Gründungssohle = 19.00
Reibungswinkel φ [Grad] = 30.00
Kohäsion c [kN/m²] = 0.00

Tragfähigkeitsbeiwerte N_c, N_q, N_γ = 30.14 18.40 10.05
Neigungsbeiwerte i_c, i_q, i_γ = 0.98 0.98 0.97
Geländeneigungsbeiwerte λ_c, λ_q, λ_γ = 0.60 0.33 0.22

| | | |
|---|---|-----------|
| Bemessungswert Beanspruchung V_d | = | 264.00 kN |
| Bemessungswert Grundbruchwiderstand R_d | = | 274.07 kN |

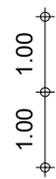
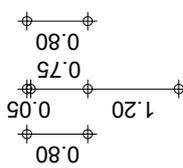
$V_d = 259.73$ kN (V-Kraft Sohlfuge, Bem.wert)
+ 4.27 kN (E_{pvd})
- 0.00 kN ($0.5 * E_{pvd}$, mit $\delta_p=0$ ermittelt)

$$V_d/R_d = 0.96 < 1.0$$

***** Nachweis erfüllt *****

Hinweis: die Böschungshöhe wurde auf 1/3 der verbleibenden Breite der Grundbruchfigur von 7.55 m angesetzt, da λ für unendlich ausgedehnte Böschungen gilt.

Aushub A
 $z = 0.05 \text{ m}$



$V_q = 140.00 \text{ kN/m}$

$M_q = 19.00 \text{ kNm/m}$

$H_q = -5.50 \text{ kN/m}$

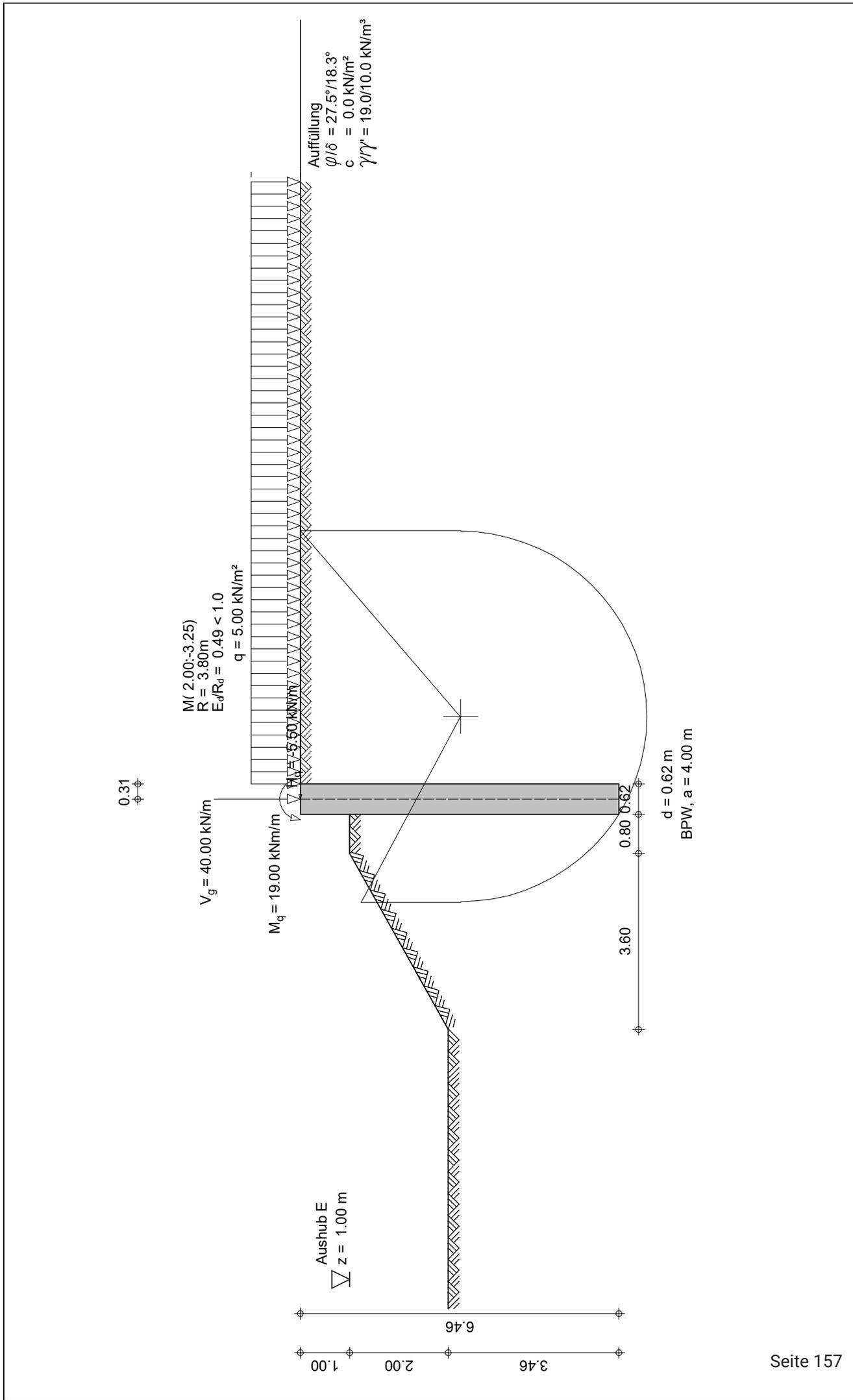
Auffüllung
 $\varphi/\delta = 30.0^\circ/20.0^\circ$
 $c = 0.0 \text{ kN/m}^2$
 $\gamma/\gamma' = 19.0/10.0 \text{ kN/m}^3$
 $E_s = 20.0 \text{ MN/m}^2$

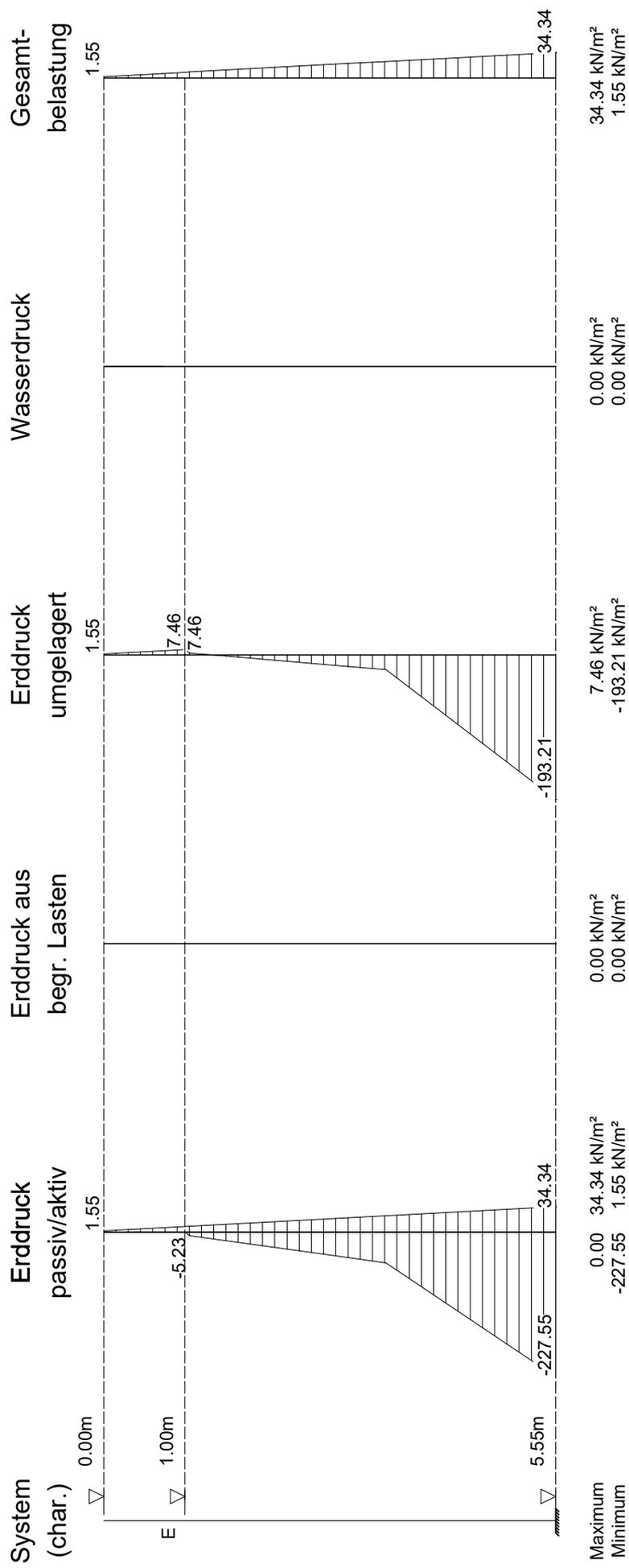
$\sigma_{\text{Red}} = 172.2 / 87.6 \text{ kN/m}^2$
 $E_{\text{d,Gr}}/R_{\text{d,Gr}} = 0.96 < 1.0$
 $E_{\text{d,GI}}/R_{\text{d,GI}} = 0.11 < 1.0$

$f_{\text{ak}} = 3.50 \text{ MN/m}^2$
 $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$
 $\max \sigma_{\text{cd}} = 0.172 \text{ MN/m}^2$
 $\max \tau_{\text{cd}} = 0.006 \text{ MN/m}^2$
 Kubatur: $1.6 \text{ m}^3/\text{m}$

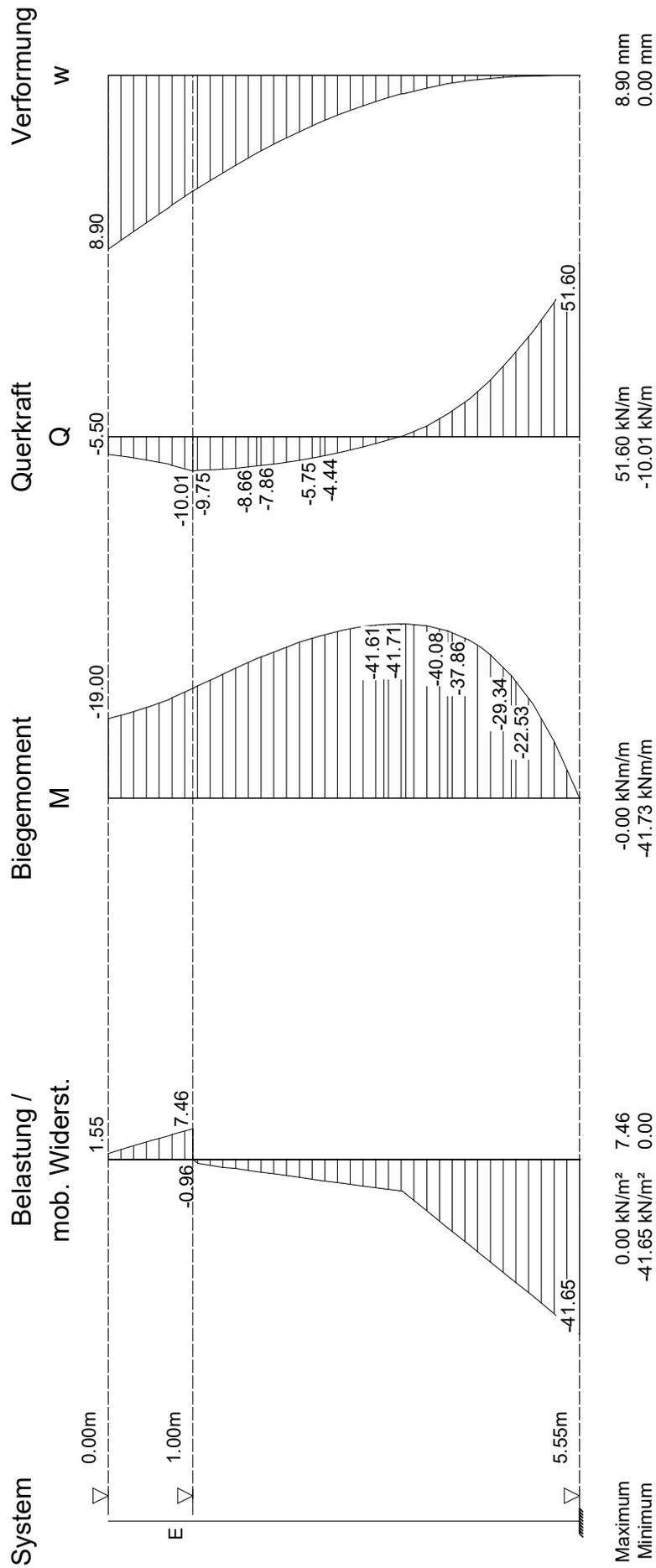


| | |
|----------|----------|
| Aushub | A |
| Lastfall | I |
| Maßstab | : 1: 100 |

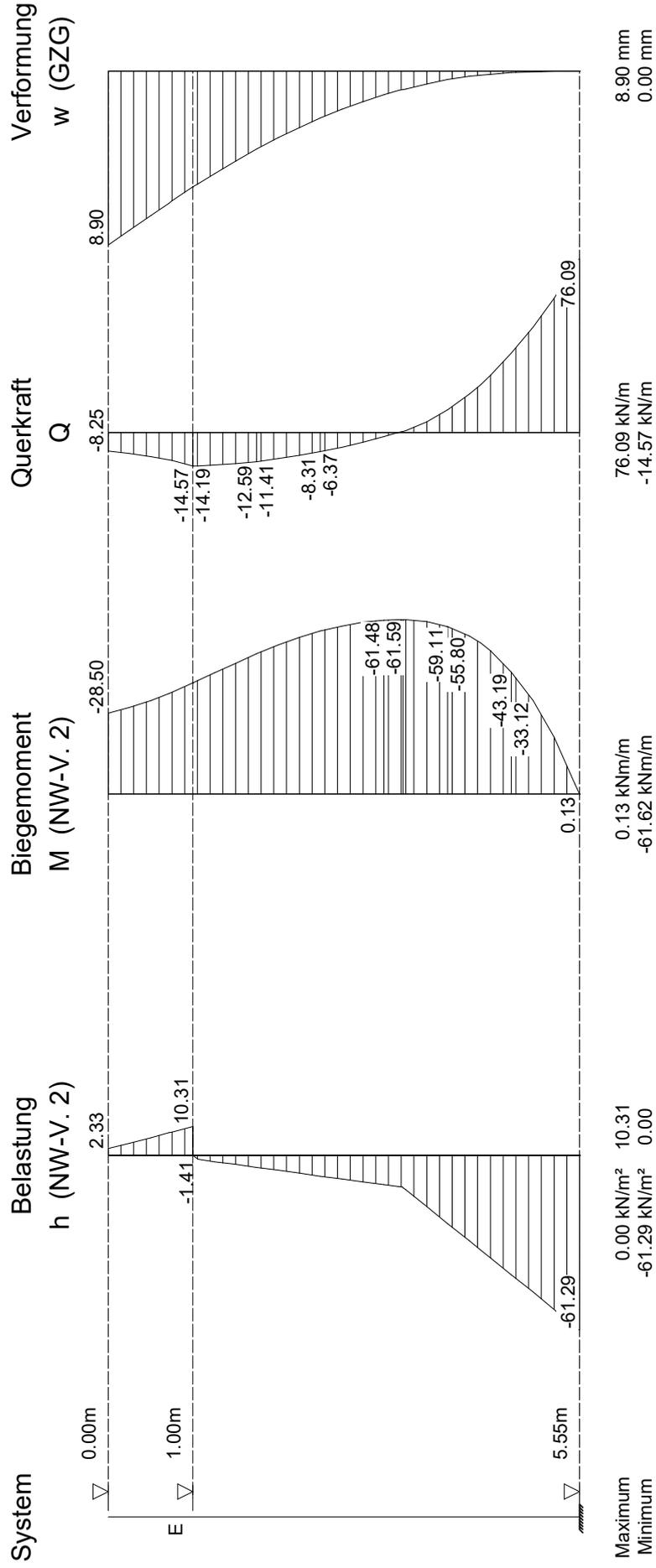




Schnittgrößen aus Gesamtlasten, charakteristisch



Schnittgrößen aus Gesamtlasten, Bemessungswerte



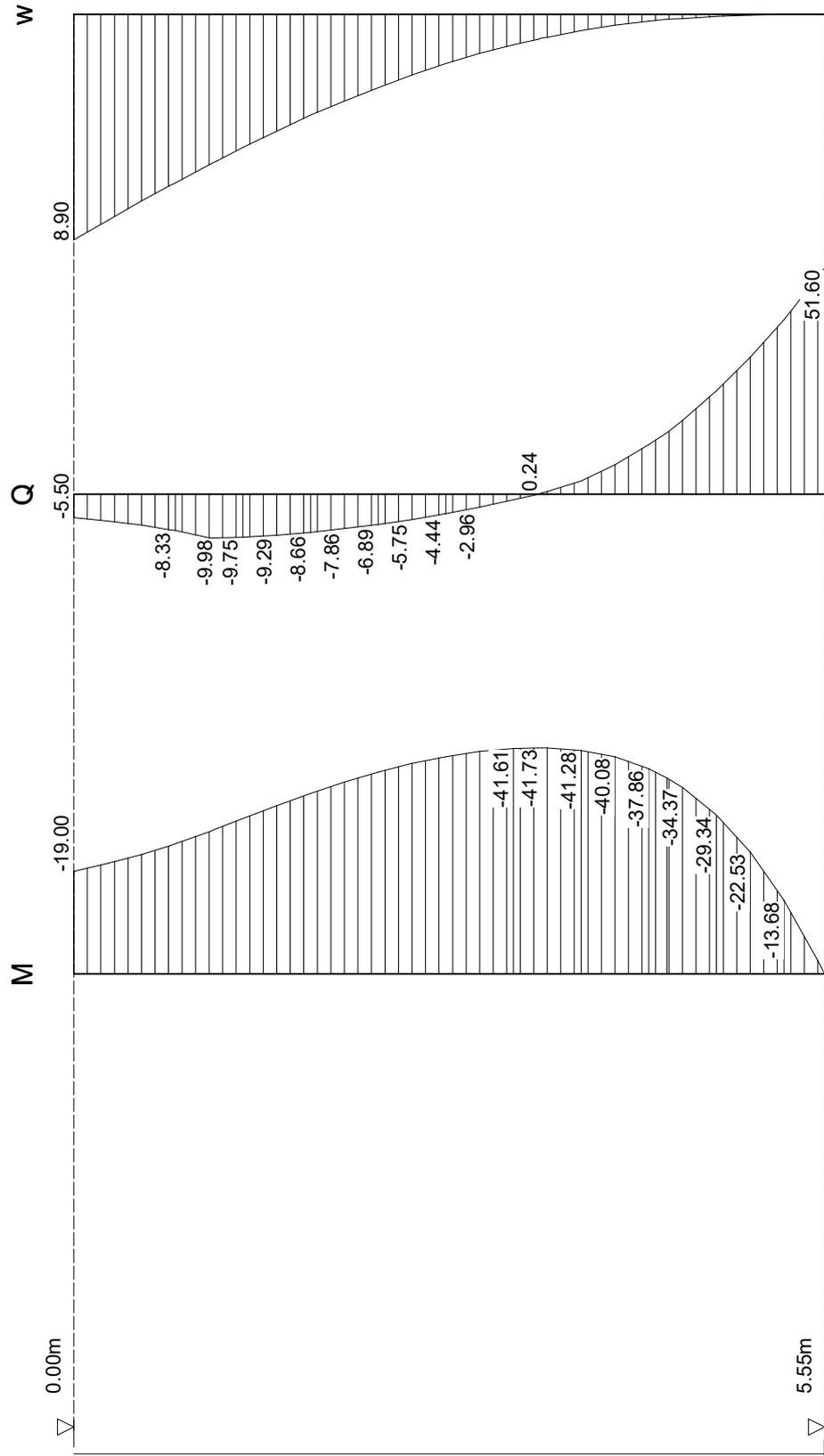
Einhüllende Schnittgrößen, charakteristisch

System

Biegemoment

Querkraft

Verformung



Maximum
Minimum

0.00
0.00

0.00
-10.01

8.90
0.00

0.00 kN/m
-41.73 kN/m

51.60 kN/m
0.00 kN/m

0.00 mm
0.00 mm

Einhüllende

Maßstab : 1:50

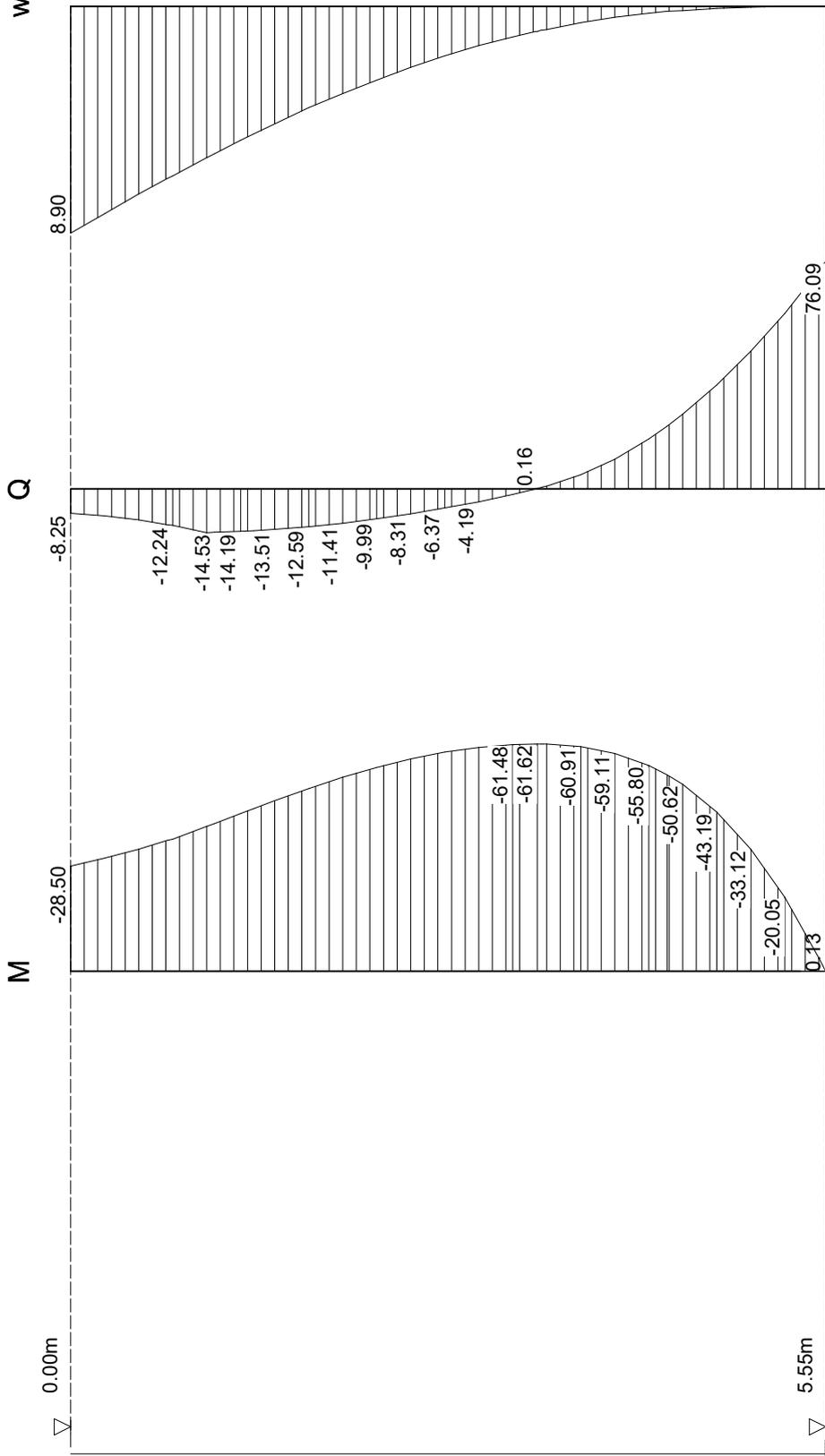
Einhüllende Schnittgrößen, Bemessungswerte

Verformung
w

Querkraft
Q

Biegemoment
M

System



| | | | | | | |
|---------|------|--------------|--------|------------|------|---------|
| Maximum | 0.13 | 0.00 kNm/m | 0.00 | 76.09 kN/m | 8.90 | 0.00 mm |
| Minimum | 0.00 | -61.62 kNm/m | -14.57 | 0.00 kN/m | 0.00 | 0.00 mm |

Teilsicherheitsbeiwerte für Hydr. Grundbruch (GZ HYD)

| γ - | H | G, stb |
|------------|-------|--------|
| BS-P | 1.900 | 0.950 |
| BS-T | 1.900 | 0.950 |
| BS-A | 1.450 | 0.950 |
| BS-T/A | 1.675 | 0.950 |

Teilsicherheitsbeiwerte für Ermittlung der Wandlänge (GEO)

Berechnung mit Nachweisverfahren 2

Kombination mit Teilsicherheitsbeiwerten der Gruppen A1 + M1 + R2

| γ - | G | E0g | W | L | Ol | Q | Qv | | | |
|------------|-------|-------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| BS-P | 1.350 | 1.200 | 1.350 | 1.350 | 1.350 | 1.500 | 1.500 | | | |
| BS-T | 1.200 | 1.100 | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.300 | 1.300 | | | |
| BS-A | 1.100 | 1.000 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | | | |
| BS-T/A | 1.150 | 1.050 | 1.150 | 1.150 | 1.150 | 1.200 | 1.200 | | | |
| γ - | Ep | Wg | γ | φ | c | cu | R,h | b | s | |
| BS-P | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-T | 1.300 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-A | 1.200 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-T/A | 1.250 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |

Ermittlung der Schnittgrößen (STR) mit gleichen Beiwerten wie Ermittlung der Wandlänge (GEO)

Ermittlung der Verformungen mit charakteristischen Werten (GZG)

Ermittlung der Ankerlängen (GEO) mit gleichen Beiwerten wie Ermittlung der Wandlänge (GEO)

| | |
|------------|--|
| γ - | Teilsicherheitsbeiwert für... |
| H | Strömungsdruck (ungünstiger Untergrund) |
| G, stb | günstige ständige Einwirkungen |
| G | Erddruck aus Bodeneigengewicht (außer Ruhedruck) |
| E0g | Erdruhedruck aus Bodeneigengewicht und ständigen Auflasten |
| W | ungünstig wirkenden Wasserdruck |
| L | Erddruck aus ständigen Lasten (außer Ruhedruck) |
| Ol | Ständige Lasten bei Erdruhedruck |
| Q | Einwirkungen aus Verkehrslasten |
| Qv | Einwirkungen aus Bahnverkehrslasten |
| Ep | Erdwiderstand |
| Wg | günstig wirkenden Wasserdruck |
| γ | spezifisches Gewicht |
| φ | Reibungsbeiwert $\tan(\varphi)$ |
| c | Kohäsion c |
| cu | Kohäsion undränert |
| R,h | Gleitwiderstand |
| b | Spitzendruck |
| s | Mantelreibung |

Lastfall I, Typ BS-P

Erddruckverlauf (char.) ohne Umlagerung [kN/m²]

| Tiefe z | Summe- e_v | e_n -Summe | e_n -Boden+Großfl. | e_n -Auflast |
|---------|--------------|--------------|----------------------|----------------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.00 | 0.000 | 1.555 | 1.555 | 0.000 |
| 7.50 | 58.923 | 45.864 | 45.864 | 0.000 |
| 7.50 | 58.923 | 45.864 | 45.864 | 0.000 |
| 100.00 | 9839.840 | 592.345 | 592.345 | 0.000 |

Aushub Nr. E

Wand krägt voll aus
Wandfuß eingespannt (nach Blum)

*** Hinweis: Aufgelöste Bohrpfahlwand wird wie Trägerbohlwand berechnet

Negativer Erddruck wirkt mit auf das statische System

Keine Umlagerung

Berme vor der Wand: $x_1 = 0.80$ m, $x_2 = 4.40$ m, $dh = 2.00$ m

*** Hinweis: Die Böschung vor der Wand wird abgeflacht, $\varphi = 27.5$ Grad
 $x_1 = 0.56$ m, $x_2 = 4.40$ m, $dh = 2.00$ m

Iteration der Wandlänge

| Länge | Summe M | Summe M (räuml.Erddruck) |
|-------|---------|--------------------------|
| 1.50 | 45.96 | |
| 2.50 | 51.72 | |
| 4.40 | -6.26 | |
| 4.31 | 0.69 | |
| 4.32 | | 59.38 |
| 5.32 | | 18.01 |
| 6.22 | | -78.97 |
| 5.92 | | -38.40 |
| 5.62 | | -6.46 |
| 5.53 | | 1.61 |
| 5.54 | | 0.75 |
| 5.55 | | -0.13 |

| Passiver Erddruck | char. Wert | | Bemessungswert |
|-------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Tiefe z [m] | $e_{ph,k}$ [kN/m ²] | Tiefe z [m] | $e_{ph,d}$ [kN/m ²] |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |
| 1.059 | -5.229 | 1.059 | -3.735 |
| 3.000 | -34.309 | 3.000 | -24.507 |
| 3.462 | -41.230 | 3.462 | -29.450 |
| 5.550 | -227.549 | 5.550 | -162.535 |
| Summe $E_{ph,k}$ | -336.584 kN/m | Summe $E_{ph,d}$ | -240.417 kN/m |

Rammtiefenzuschlag nach EAB (EB25) = $0.2 \cdot 4.55$ m = 0.91 m
Gesamtlänge der Wand: 6.46 m, Einbindetiefe $t = 5.46$ m
(einschl. Rammtiefenzuschlag nach EAB)

Aushubtiefe $z = 1.00$ m, Wasserstand = 100.00 m
Fußstützkraft: $E_d = 182.02$ kN $\leq R_d = 240.42$ kN
Ersatzkraft am Fuß: $C_d = -76.09$ kN

Räumlicher Erddruck nach DIN 4085:2017 je m Wandbreite

$b = 0.620$ m, $\mu_{pgh} = 3.041$, $\mu_{pch} = 4.143$
 b kleiner als $0.3h = 1.365$ m, $R_k = 158.66$ kN
Erddruck bei $\gamma_{Ep} / 0.800 = 1.750$: $R_d = 90.66$ kN
 $E_d = 90.55$ kN $\leq R_d$

Belastung und Schnittgrößen der Baugrubenwand

Charakteristische Schnittgrößen

Charakteristische Verformungen

Alle Werte je m Wand, bezogen auf die Schwerachse

| Tiefe z | H-Druck | Verform. | Moment | Querkraft | A-H | Fed.konst. |
|---------|------------|----------|-----------|-----------|------|------------|
| [m] | h [kN/m] | w [mm] | M [kNm] | Q [kN] | [kN] | [kN/mm] |
| 0.000 | 1.55 | 8.9 | -19.00 | 0.00 | | |

| Tiefe z [m] | H-Druck h [kN/m] | Verform. w [mm] | Moment M [kNm] | Querkraft Q [kN] | A-H [kN] | Fed.konst. [kN/mm] |
|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| | | 8.9 | | -5.50 | | |
| 0.710 | 5.75 | 6.7 | -23.65 | -8.09 | | |
| 1.000 | 7.46 | 5.9 | -26.26 | -10.01 | | |
| 1.000 | 0.00 | | | | | |
| 1.059 | -0.96 | 5.7 | -26.85 | -9.98 | | |
| 1.343 | -1.74 | 5.0 | -29.64 | -9.60 | | |
| 3.000 | -6.28 | 1.5 | -41.08 | -2.96 | | |
| 3.430 | -7.46 | 1.0 | -41.73 | 0.00 | M | |
| 3.462 | -7.55 | 0.9 | -41.73 | 0.24 | | |
| 4.385 | -22.61 | 0.2 | -36.16 | 14.15 | | |
| 5.550 | -41.65 | 0.0 | 0.00 | 51.60 | | |

Bedeutung: M=max/min-M (Q=0), A=Anker oder Abstützung, B=Bettungsfeder
E=Erdaulager

| | | | | | | | | |
|--------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| Aushub Nr. E | maxM | 0.00 | zugQ | 51.60, | maxQ | 51.60 | zugM | 0.00 |
| | minM | -41.73 | zugQ | 0.00, | minQ | -10.01 | zugM | -26.26 |
| | maxw | 8.9 mm | | | | | | |

Längsbelastung der Baugrubenwand

| Tiefe z [m] | Längsbel. n [kN/m] | Normalkraft N [kN] |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 0.000 | 2.40 | -40.00 |
| 0.710 | 3.79 | -42.20 |
| 1.000 | 4.36 | -43.38 |
| 1.000 | 1.89 | -43.38 |
| 1.059 | 1.78 | -43.49 |
| 1.343 | 1.70 | -43.98 |
| 3.000 | 1.20 | -46.39 |
| 3.430 | 1.07 | -46.88 |
| 3.462 | 1.06 | -46.91 |
| 4.385 | -0.58 | -47.14 |
| 5.550 | -2.65 | -45.25 |

Gleichgewicht der H- und V-Kräfte

(Bemessungswerte inkl. Sicherheitsbeiwerte)

| | von z | bis z | H-Komponente | V-Komponente | [kN/m] |
|--------------------------------|-------|-------|--------------|--------------|----------------|
| Erddruck: | 0.00 | 1.00 | 6.32 | 2.09 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | | | 0.00 | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | | | 8.25 | 54.00 | |
| Fußersatzkraft: | | | 76.09 | 12.28 | (δ_c) |
| Summe: | | | 90.66 | 68.37 | |
| Räumlicher Erddwid.: | 1.00 | 5.55 | -90.66 | | |
| (maßg. Reibungsanteil: | | | -29.81) | -9.88 | (δ_p) |
| (maßg. Kohäsionsanteil: | | | 0.00) | 0.00 | (δ_p) |
| Wandengewicht: | | | | 14.14 | |
| Gesamtsumme (mit Wandgewicht): | | | 0.00 | 72.63 | (nach unten) |

Nachweis der Vertikalkomp. des mobilisierten Erdwiderstandes (EAB,EB 9)

| Einwirkungen: | | V_k [kN/m] | |
|-----------------|--|--------------|----------------|
| Erddruck: | | 1.49 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | | 40.00 | |
| Wandengewicht: | | 10.47 | |
| Fußersatzkraft: | ($1/2 C_v$) | 4.16 | (δ_c) |
| Summe: | | 56.13 | |
| Erdwiderstand: | ($B_v - 1/2 * C_h * \tan(\delta_p)$) | -1.84 | |

Nachweis: $V_k = 56.13 \text{ kN/m} \geq B_{vk} = -1.84 \text{ kN/m}$

*** Nachweis erfüllt ***

Nachweis der Abtragung von Vertikalkräften in den Untergrund (EAB,EB 84)

| Einwirkungen: | V_d [kN/m] | |
|------------------------------|--------------|----------------|
| Erddruck: | 2.09 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | 54.00 | |
| Wandeingengewicht: | 14.14 | |
| Fußersatzkraft: (1/2 C_v) | -6.14 | (δ_c) |
| Summe: | 64.09 | |

| Widerstände: | R_d [kN/m] |
|--|--------------|
| Fußfläche für Spitzendruck (cm^2/m): 754.8 | |
| Spitzendruck: | 32.35 |
| Mantelreibung: | 47.48 |
| Summe: | 79.83 |

Nachweis: $V_d = 64.09 \text{ kN/m} \leq R_d = 79.83 \text{ kN/m}$

*** Nachweis erfüllt ***

Geländebruch-Nachweis

Lastfall I (Typ: BS-P)

Gleitkörper von $x = -1.80$ bis 5.80 m

Gleitkreis: $x_M = 2.00$ m, $z_M = -3.25$ m, $R = 3.80$ m

Bestimmung der Lamellen-Anteile

| x_M | Breite b | Eigen- gewicht | Auflast | Wasser- auflast | φ | c | ϑ |
|-------|-------------|-------------------|---------|--------------------|-----------|----------------------|---------------|
| [m] | [m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [Grad] | [kN/m ²] | [Grad] |
| 0.26 | 0.45 | 1.36 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -27.35 |
| 0.86 | 0.76 | 81.98 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -17.46 |
| 1.62 | 0.76 | 101.28 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -5.74 |
| 2.38 | 0.76 | 101.28 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 5.74 |
| 3.14 | 0.76 | 99.02 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 17.46 |
| 3.90 | 0.76 | 94.14 | 3.41 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 30.00 |
| 4.66 | 0.76 | 85.68 | 4.94 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 44.43 |
| 5.42 | 0.76 | 67.06 | 4.94 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 64.16 |
| x_M | | | | | | $R \cdot T_i$ | $R \cdot G^*$ |
| [m] | | | | | | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 0.26 | | | | | | 2.70 | -2.37 |
| 0.86 | | | | | | 145.18 | -93.40 |
| 1.62 | | | | | | 164.34 | -38.46 |
| 2.38 | | | | | | 157.77 | 38.46 |
| 3.14 | | | | | | 154.30 | 112.80 |
| 3.90 | | | | | | 159.47 | 185.24 |
| 4.66 | | | | | | 167.38 | 240.89 |
| 5.42 | | | | | | 184.08 | 246.08 |

Summen:

1135.22

689.25

Einzellasten (ständig)

| H | V | M | Hebelarm H | Hebelarm V | $M_{\text{rückh.}}$ | $M_{\text{abtr.}}$ |
|--------|--------|---------|------------|------------|---------------------|--------------------|
| [kN/m] | [kN/m] | [kNm/m] | [m] | [m] | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 0.00 | 40.00 | 0.00 | 3.25 | -1.69 | 78.56 | -67.60 |

Einfluss von Bauwerken

| Gewicht | Hebelarm | φ | ϑ | $M_{\text{rückh.}}$ | $M_{\text{abtr.}}$ |
|---------|----------|-----------|-------------|---------------------|--------------------|
| [kN/m] | [m] | [Grad] | [Grad] | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 12.19 | -1.69 | 22.61 | -26.43 | 23.94 | -20.60 |

Ansatz des Erdwiderstands bei $x = 0.03$ m:

| Kraft E_p | Hebelarm | Wasserdruck W | Hebelarm | $M_{\text{rückh.}}$ | $M_{\text{abtr.}}$ |
|-------------|----------|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| [kN/m] | [m] | [kN/m] | [m] | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 0.03 | 3.23 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 |

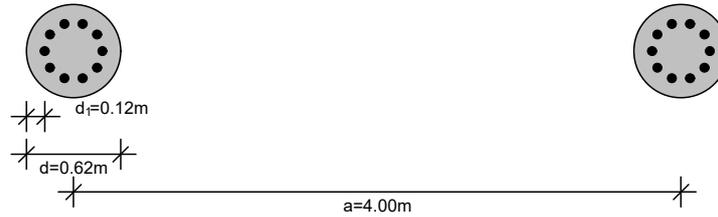
Einwirkungen $E_d = 601.05$ kN
Widerstände $R_d = 1237.82$ kN

$E_d/R_d = 0.49 < 1.0$

*** Nachweis erfüllt ***

Bemessung der Bohrfahlwand (bis 5.55 m)

Maßstab: 1:50
Bewehrter Pfahl Beton: C20/25 500 (B)



Maßgebende Schnittgrößen (je Pfahl):

Sicherheitsbeiwerte

für Lasten: γ_F nach Nachweisverfahren 2
für Widerstände: $\gamma_R = 1.50$ (Beton), 1.15 (Stahl)

Bemessungsschnittgrößen

| | |
|----------------------|--|
| maßgebendes Moment | max. $M_d = 0.51$ kNm im Aushub E zug. $N_d = -241.42$ kN bei $z = 5.55$ m |
| maßgebendes Moment | min. $M_d = -246.50$ kNm im Aushub E zug. $N_d = -252.83$ kN bei $z = 3.42$ m |
| maßgebende Querkraft | max. $V_d = 152.19$ kN im Aushub E zug. $M_d = 0.51$ kNm zug. $N_d = -241.42$ kN bei $z = 5.55$ m |

*** Hinweis: Die Ersatzkraft C bei Einspannung nach Blum wird nach Weißenbach mit dem halben Wert angesetzt.

Biegebemessung nach DIN EN 1992 (Eurocode 2)

Materialkennwerte: Beton C20/25 Stahl 500 (B)

Durchmesser $d = 0.62$ m, $d_1 = 0.12$ m, $EI = 217.60$ MNm² (pro Pfahl)

| | |
|-----------------------------|--|
| bei max. M ($z = 5.55$ m): | Betondehnung = -2.11 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = -1.91 ‰ |
| | tot. $\omega = 0.000$ |
| | erf. Gesamtbew. $A_S = 0.00$ cm ² < Mindestbewehrung nach EN 1536 = 15.10 cm ² |

gewählt: 10 \emptyset 20 mm = 31.42 cm²

| | |
|-----------------------------|---|
| bei min. M ($z = 3.42$ m): | Betondehnung = -3.50 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = 5.04 ‰ |
| | tot. $\omega = 0.328$ |
| | erf. Gesamtbew. $A_S = 25.78$ cm ² |

gewählt: 10 \emptyset 20 mm = 31.42 cm²

Querkraftbemessung nach DIN EN 1992 (Eurocode 2)

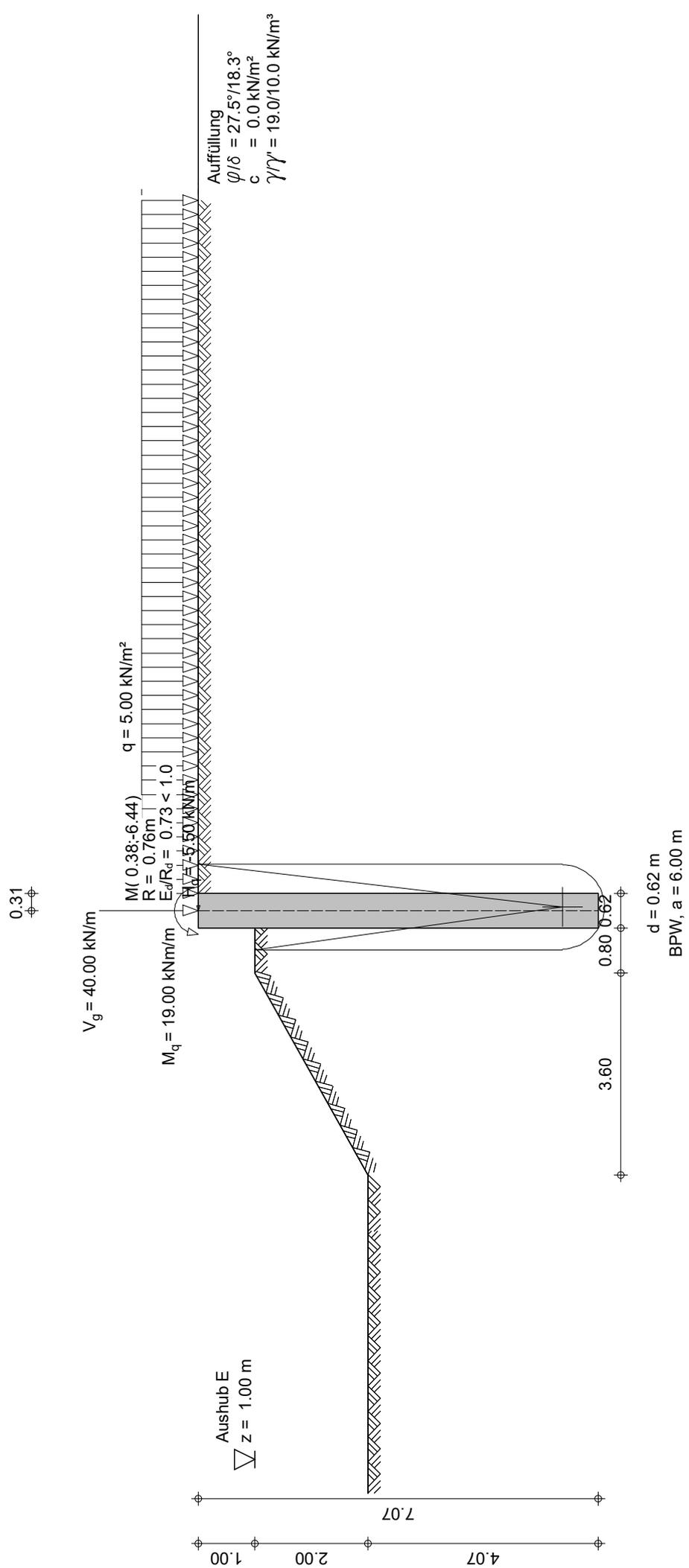
| | |
|-----------------------------|--|
| bei max. V ($z = 5.55$ m): | $V_{Rd,max} = 421.00$ kN > $V_d = 152.19$ kN |
| | $V_{Rd,ct} = 100.61$ kN |
| | Druckstrebenneig. $\varphi = 18.4^\circ$ |
| | Betondehnung = -2.11 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = -1.91 ‰ |
| | erf. Schubbew. $A_{SW} = 4.22$ cm ² /m Pfahl (Mindestbewehrung) |

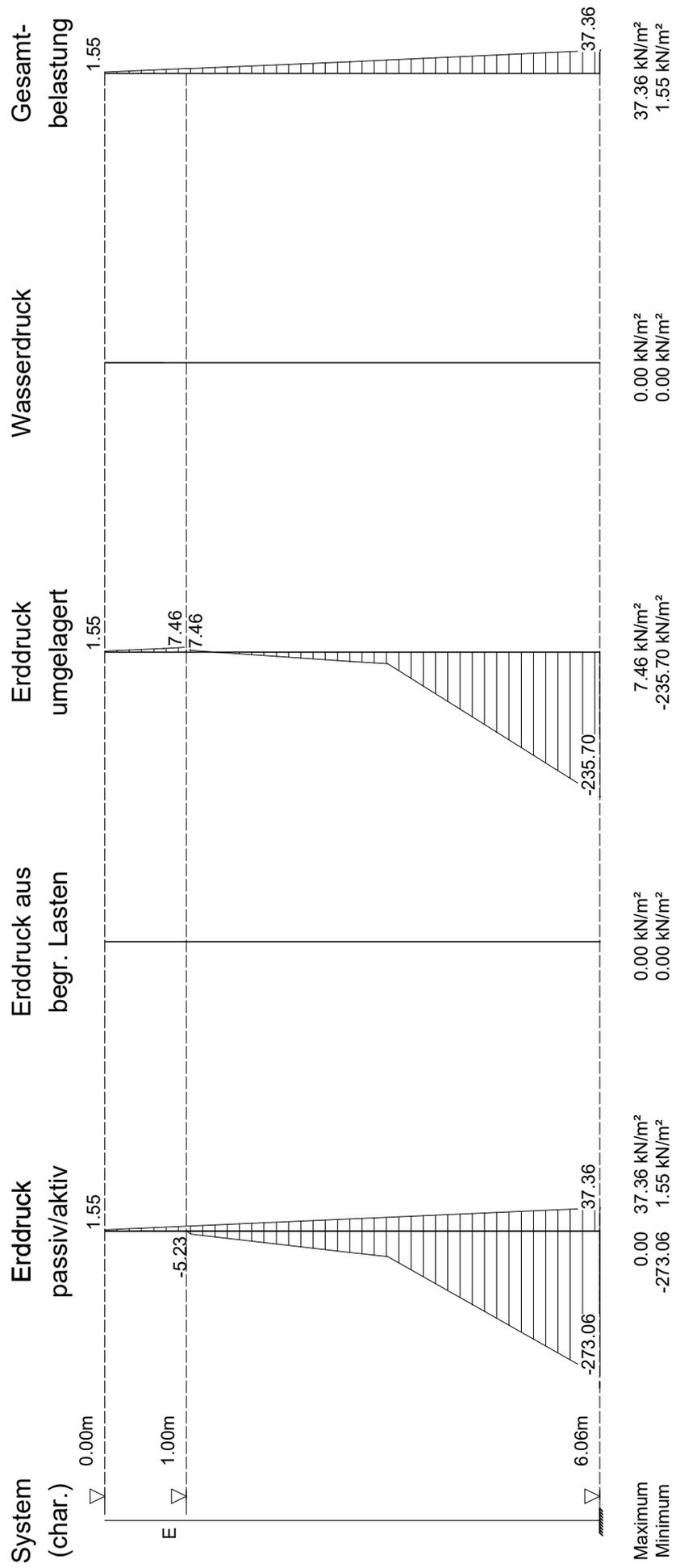
gewählt: \emptyset 10 mm, Ganghöhe 20 cm = 7.86 cm²/m

Abschnittsweise Bemessung

| Tiefe [m] | Moment M_d [kNm] | Normalkraft N_d [kN] | Querkraft V_d [kN] | Biegebewehrung [cm ²] | Schubbewehrung [cm ² /m] |
|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| 0.00 | -114.00 | -216.00 | 33.00 | 6.34 # | 4.22 |
| 0.25 | -122.62 | -219.65 | 36.33 | 7.37 # | 4.22 |
| 0.50 | -132.33 | -223.96 | 41.65 | 8.56 # | 4.22 |
| 0.75 | -143.62 | -228.93 | 48.97 | 9.99 # | 4.22 |
| 1.00 | -156.98 | -234.57 | 58.28 | 11.77 # | 4.22 |
| 1.25 | -171.39 | -236.95 | 56.74 | 13.84 # | 4.22 |
| 1.50 | -185.26 | -239.20 | 54.06 | 15.95 | 4.22 |
| 1.75 | -198.34 | -241.35 | 50.36 | 17.97 | 4.22 |
| 2.00 | -210.36 | -243.38 | 45.66 | 19.83 | 4.22 |
| 2.25 | -221.08 | -245.31 | 39.95 | 21.63 | 4.22 |
| 2.50 | -230.25 | -247.12 | 33.23 | 23.15 | 4.22 |
| 2.75 | -237.61 | -248.83 | 25.50 | 24.36 | 4.22 |
| 3.00 | -242.92 | -250.42 | 16.76 | 25.19 | 4.22 |
| 3.25 | -245.91 | -251.91 | 7.02 | 25.71 | 4.22 |
| 3.42 | -246.50 | -252.83 | 0.00 | 25.78 | 4.22 |
| 3.50 | -246.34 | -253.28 | 1.90 | 25.75 | 4.22 |
| 3.75 | -243.64 | -254.19 | 9.41 | 25.24 | 4.22 |
| 4.00 | -236.43 | -254.44 | 19.93 | 23.99 | 4.22 |
| 4.25 | -223.21 | -254.04 | 33.45 | 21.79 | 4.22 |
| 4.50 | -202.48 | -252.99 | 49.97 | 18.38 | 4.22 |
| 4.75 | -172.74 | -251.28 | 69.50 | 13.73 # | 4.22 |
| 5.00 | -132.48 | -248.92 | 92.04 | 8.00 # | 4.22 |
| 5.25 | -80.20 | -245.90 | 117.57 | 1.64 # | 4.22 |
| 5.50 | -14.41 | -242.23 | 146.12 | 0.00 # | 6.83 |
| 5.55 | 0.51 | -241.42 | 152.19 | 0.00 # | 4.22 |

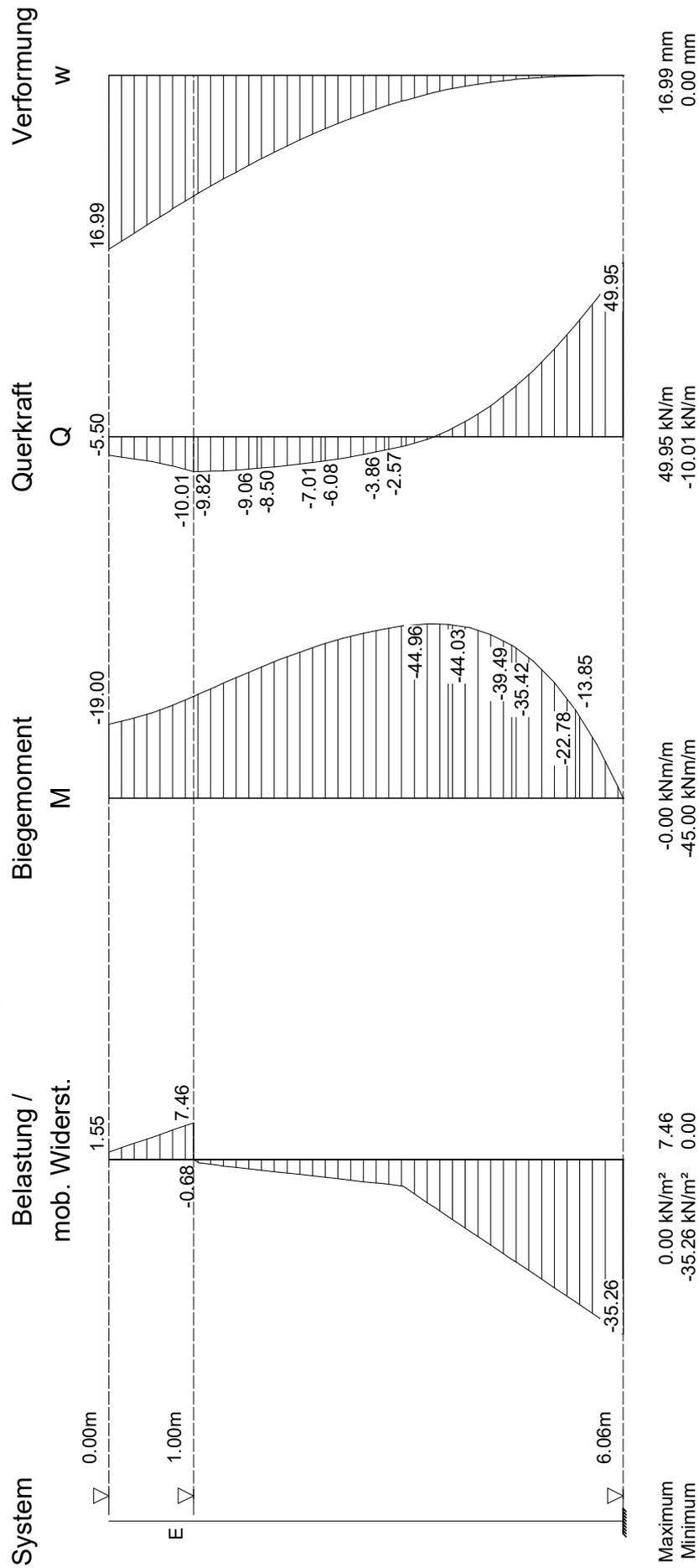
= Biegebewehrung < Mindestbewehrung nach EN 1536 = 15.10 cm²



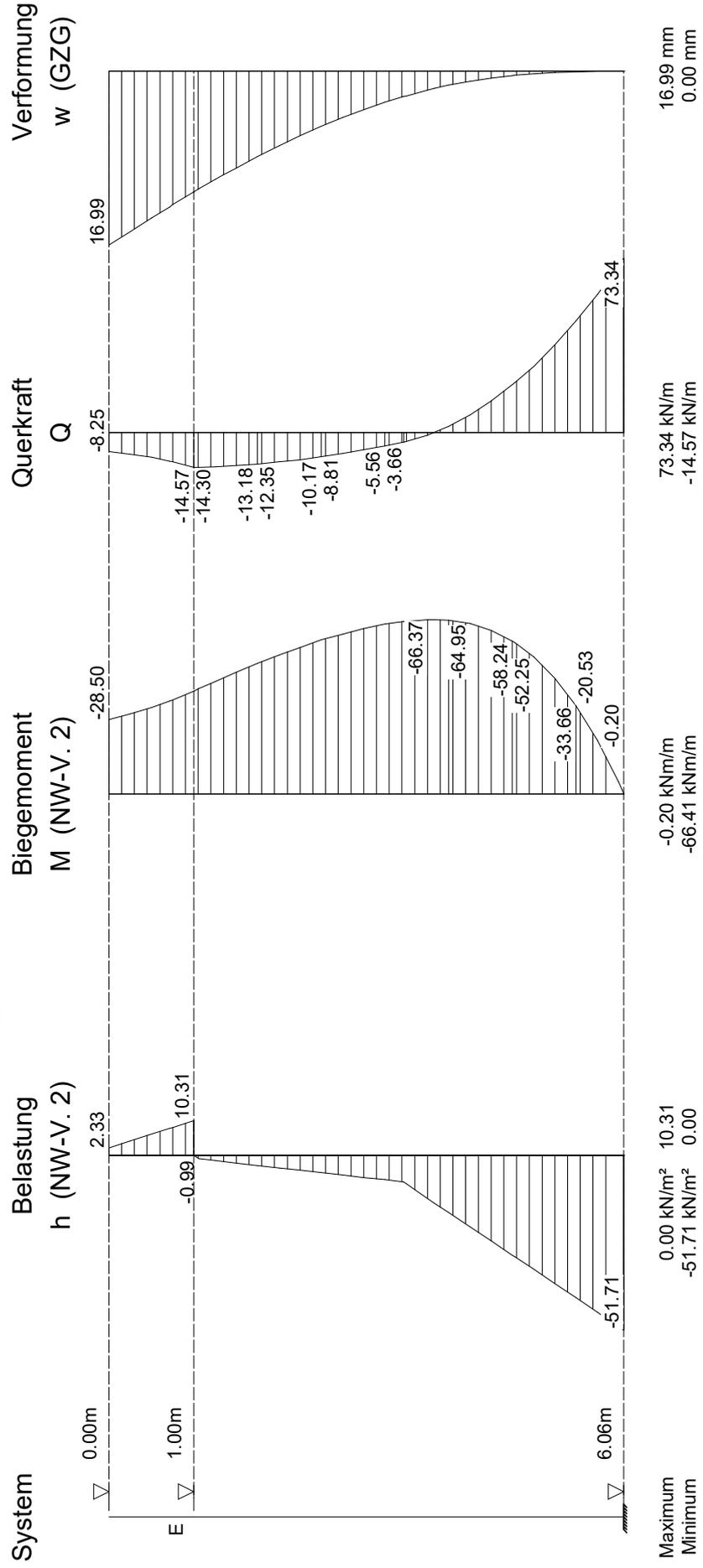


Maximum 0.00 37.36 kN/m²
 Minimum -273.06 1.55 kN/m²

Schnittgrößen aus Gesamtlasten, charakteristisch

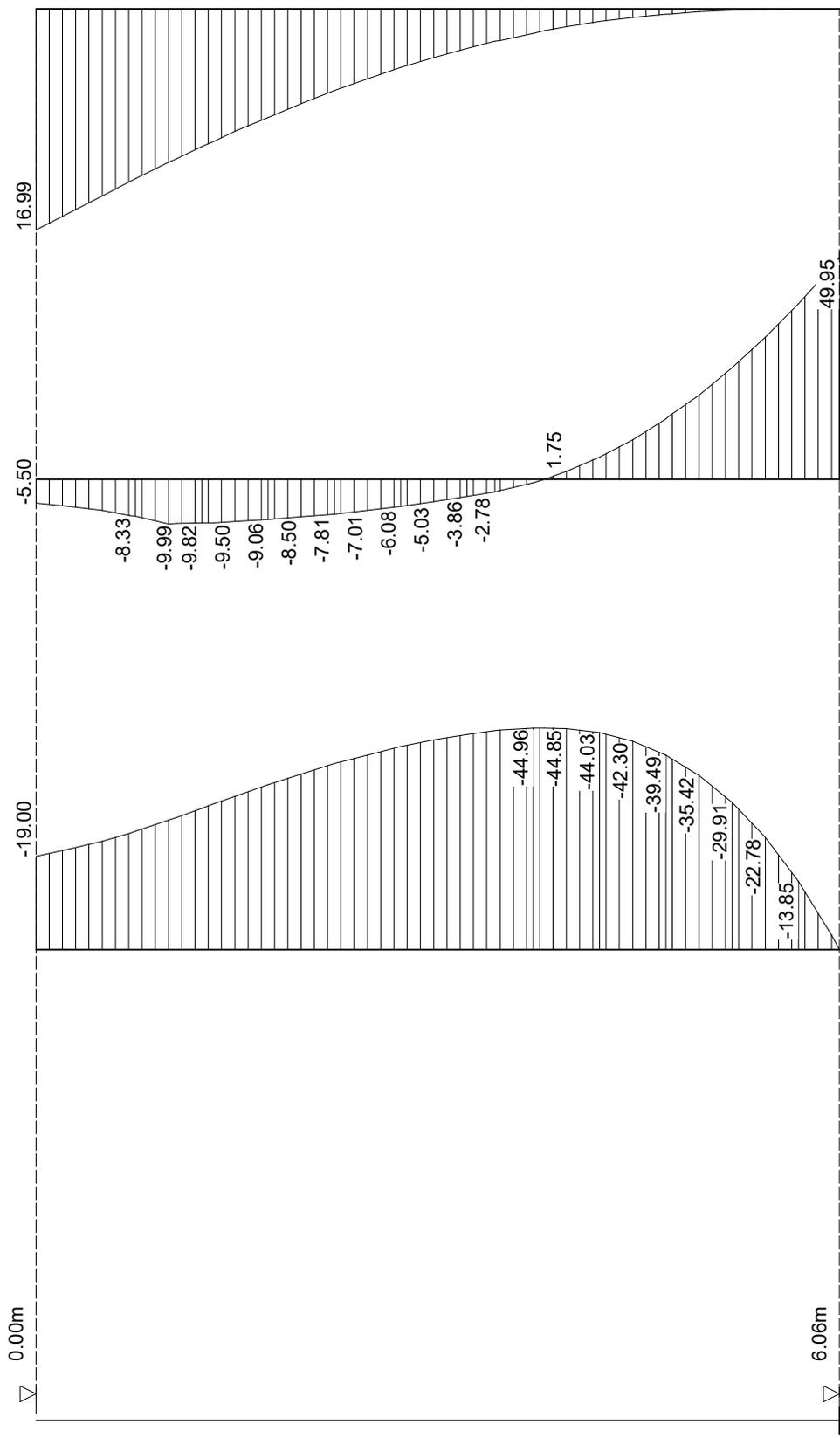


Schnittgrößen aus Gesamtlasten, Bemessungswerte



Einhüllende Schnittgrößen, charakteristisch

System Biegemoment M Querkraft Q Verformung w



Maximum 0.00 0.00 kNm/m 0.00 49.95 kN/m 16.99 0.00 mm
 Minimum -45.00 kNm/m -10.01 -0.00 kN/m 0.00 0.00 mm

Einhüllende

Maßstab : 1: 50

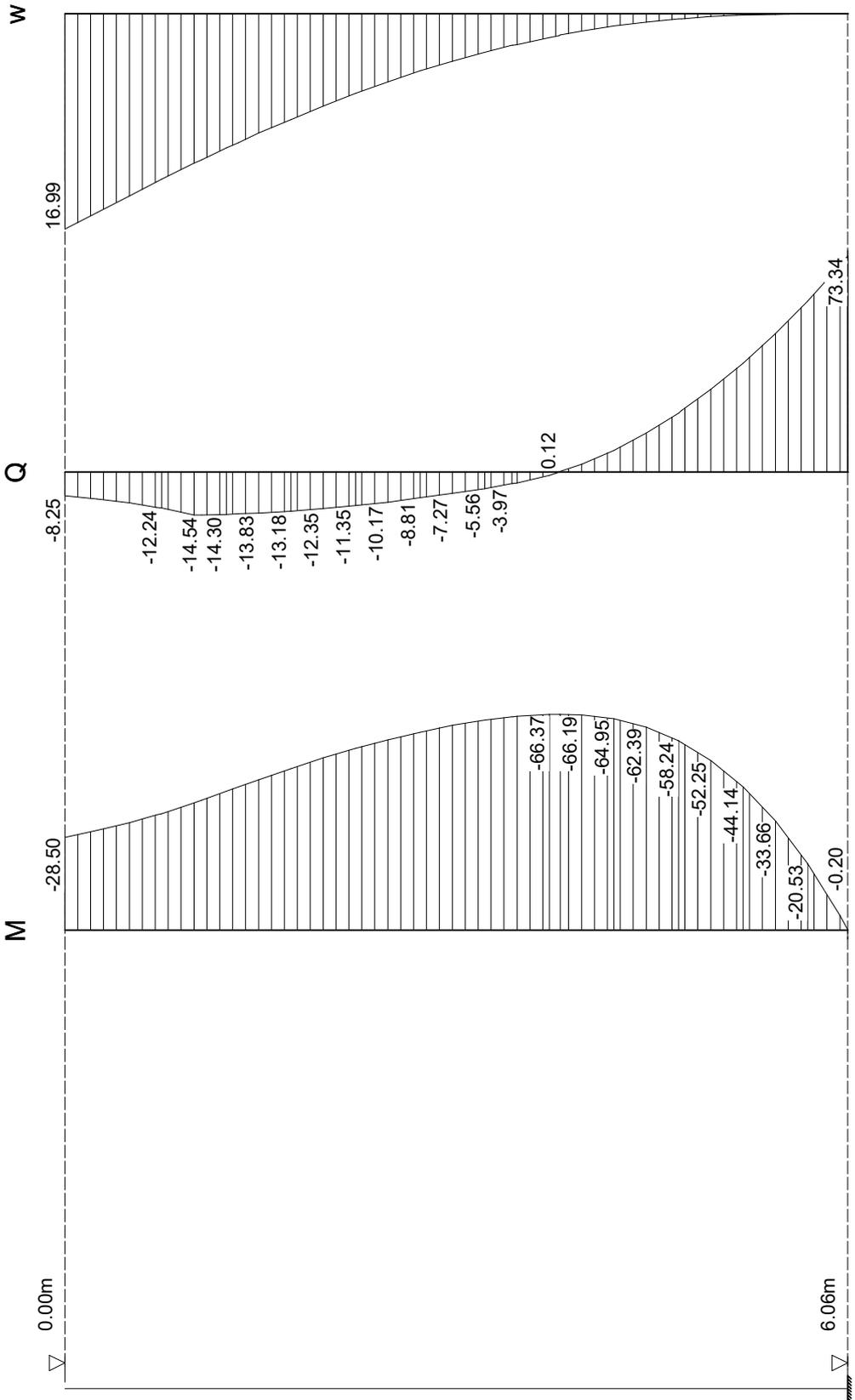
Einhüllende Schnittgrößen, Bemessungswerte

System

Biegemoment

Querkraft

Verformung



Maximum
Minimum

0.00
-14.57
73.34 kN/m
0.00 kN/m

16.99
0.00
0.00 mm
0.00 mm

Teilsicherheitsbeiwerte für Hydr. Grundbruch (GZ HYD)

| γ - | H | G, stb |
|------------|-------|--------|
| BS-P | 1.900 | 0.950 |
| BS-T | 1.900 | 0.950 |
| BS-A | 1.450 | 0.950 |
| BS-T/A | 1.675 | 0.950 |

Teilsicherheitsbeiwerte für Ermittlung der Wandlänge (GEO)

Berechnung mit Nachweisverfahren 2

Kombination mit Teilsicherheitsbeiwerten der Gruppen A1 + M1 + R2

| γ - | G | E0g | W | L | Ol | Q | Qv | | | |
|------------|-------|-------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| BS-P | 1.350 | 1.200 | 1.350 | 1.350 | 1.350 | 1.500 | 1.500 | | | |
| BS-T | 1.200 | 1.100 | 1.200 | 1.200 | 1.200 | 1.300 | 1.300 | | | |
| BS-A | 1.100 | 1.000 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | 1.100 | | | |
| BS-T/A | 1.150 | 1.050 | 1.150 | 1.150 | 1.150 | 1.200 | 1.200 | | | |
| γ - | Ep | Wg | γ | φ | c | cu | R,h | b | s | |
| BS-P | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-T | 1.300 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-A | 1.200 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |
| BS-T/A | 1.250 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.100 | 1.400 | 1.400 | |

Ermittlung der Schnittgrößen (STR) mit gleichen Beiwerten wie Ermittlung der Wandlänge (GEO)

Ermittlung der Verformungen mit charakteristischen Werten (GZG)

Ermittlung der Ankerlängen (GEO) mit gleichen Beiwerten wie Ermittlung der Wandlänge (GEO)

| | |
|------------|--|
| γ - | Teilsicherheitsbeiwert für... |
| H | Strömungsdruck (ungünstiger Untergrund) |
| G, stb | günstige ständige Einwirkungen |
| G | Erddruck aus Bodeneigengewicht (außer Ruhedruck) |
| E0g | Erdruhedruck aus Bodeneigengewicht und ständigen Auflasten |
| W | ungünstig wirkenden Wasserdruck |
| L | Erddruck aus ständigen Lasten (außer Ruhedruck) |
| Ol | Ständige Lasten bei Erdruhedruck |
| Q | Einwirkungen aus Verkehrslasten |
| Qv | Einwirkungen aus Bahnverkehrslasten |
| Ep | Erdwiderstand |
| Wg | günstig wirkenden Wasserdruck |
| γ | spezifisches Gewicht |
| φ | Reibungsbeiwert $\tan(\varphi)$ |
| c | Kohäsion c |
| cu | Kohäsion undränirt |
| R,h | Gleitwiderstand |
| b | Spitzendruck |
| s | Mantelreibung |

Lastfall I, Typ BS-P

Erddruckverlauf (char.) ohne Umlagerung [kN/m²]

| Tiefe z | Summe- e_v | e_n -Summe | e_n -Boden+Großfl. | e_n -Auflast |
|---------|--------------|--------------|----------------------|----------------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.00 | 0.000 | 1.555 | 1.555 | 0.000 |
| 7.50 | 58.923 | 45.864 | 45.864 | 0.000 |
| 7.50 | 58.923 | 45.864 | 45.864 | 0.000 |
| 100.00 | 9839.840 | 592.345 | 592.345 | 0.000 |

Aushub Nr. E

Wand krägt voll aus
Wandfuß eingespannt (nach Blum)

*** Hinweis: Aufgelöste Bohrpfahlwand wird wie Trägerbohlwand berechnet

Negativer Erddruck wirkt mit auf das statische System

Keine Umlagerung

Berne vor der Wand: $x_1 = 0.80$ m, $x_2 = 4.40$ m, $dh = 2.00$ m

*** Hinweis: Die Böschung vor der Wand wird abgeflacht, $\varphi = 27.5$ Grad
 $x_1 = 0.56$ m, $x_2 = 4.40$ m, $dh = 2.00$ m

Iteration der Wandlänge

| Länge | Summe M | Summe M (räuml.Erddruck) |
|-------|---------|--------------------------|
| 1.50 | 45.96 | |
| 2.50 | 51.72 | |
| 4.40 | -6.26 | |
| 4.31 | 0.69 | |
| 4.32 | | 68.79 |
| 5.32 | | 46.07 |
| 6.22 | | -14.21 |
| 6.03 | | 2.70 |
| 6.06 | | 0.20 |
| 6.07 | | -0.65 |

Passiver Erddruck

| Tiefe z [m] | char. Wert $e_{ph,k}$ [kN/m ²] | Tiefe z [m] | Bemessungswert $e_{ph,d}$ [kN/m ²] |
|--------------------|---|--------------------|---|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |
| 1.059 | -5.229 | 1.059 | -3.735 |
| 3.000 | -34.309 | 3.000 | -24.507 |
| 3.462 | -41.230 | 3.462 | -29.450 |
| 6.060 | -273.059 | 6.060 | -195.042 |
| Summe $E_{ph,k} =$ | -464.239 kN/m | Summe $E_{ph,d} =$ | -331.600 kN/m |

Rammtiefenzuschlag nach EAB (EB25) = $0.2 \cdot 5.07$ m = 1.01 m

Gesamtlänge der Wand: 7.07 m, Einbindetiefe $t = 6.07$ m
(einschl. Rammtiefenzuschlag nach EAB)

Aushubtiefe $z = 1.00$ m, Wasserstand = 100.00 m

Fußstützkraft: $E_d = 205.58$ kN $\leq R_d = 331.60$ kN

Ersatzkraft am Fuß: $C_d = -73.34$ kN

Räumlicher Erddruck nach DIN 4085:2017 je m Wandbreite

$b = 0.620$ m, $\mu_{pgh} = 3.207$, $\mu_{pch} = 4.369$

b kleiner als $0.3h = 1.518$ m,

Erdwiderstand bei $\gamma_{Ep} / 0.800 = 1.750$:

| | |
|---------|----------------------|
| $R_k =$ | 153.85 kN |
| $R_d =$ | 87.91 kN |
| $E_d =$ | 88.07 kN ca. = R_d |

Belastung und Schnittgrößen der Baugrubenwand

Charakteristische Schnittgrößen

Charakteristische Verformungen

Alle Werte je m Wand, bezogen auf die Schwerachse

| Tiefe z [m] | H-Druck h [kN/m] | Verform. w [mm] | Moment M [kNm] | Querkraft Q [kN] | A-H [kN] | Fed.konst. [kN/mm] |
|-------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| 0.000 | 1.55 | 17.0 | -19.00 | 0.00 | | |
| | | 17.0 | | -5.50 | | |
| 0.710 | 5.75 | 13.2 | -23.65 | -8.09 | | |
| 1.000 | 7.46 | 11.8 | -26.26 | -10.01 | | |

| Tiefe z [m] | H-Druck h [kN/m] | Verform. w [mm] | Moment M [kNm] | Querkraft Q [kN] | A-H [kN] | Fed.konst. [kN/mm] |
|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| 1.000 | 0.00 | | | | | |
| 1.059 | -0.68 | 11.5 | -26.85 | -9.99 | | |
| 1.343 | -1.23 | 10.1 | -29.65 | -9.72 | | |
| 3.000 | -4.43 | 3.7 | -42.61 | -5.03 | | |
| 3.462 | -5.32 | 2.5 | -44.43 | -2.78 | | |
| 3.834 | -9.61 | 1.7 | -45.00 | 0.00 | M | |
| 4.777 | -20.48 | 0.4 | -39.11 | 14.19 | | |
| 6.060 | -35.26 | 0.0 | 0.00 | 49.95 | | |

Bedeutung: M=max/min-M (Q=0), A=Anker oder Abstützung, B=Bettungsfeder
E=Erdaufleger

| | | | | | | | | |
|--------------|------|---------|------|--------|------|--------|------|--------|
| Aushub Nr. E | maxM | 0.00 | zugQ | 49.95, | maxQ | 49.95 | zugM | 0.00 |
| | minM | -45.00 | zugQ | 0.00, | minQ | -10.01 | zugM | -26.26 |
| | maxw | 17.0 mm | | | | | | |

Längsbelastung der Baugrubenwand

| Tiefe z [m] | Längsbel. n [kN/m] | Normalkraft N [kN] |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 0.000 | 1.77 | -40.00 |
| 0.710 | 3.16 | -41.75 |
| 1.000 | 3.73 | -42.75 |
| 1.000 | 1.26 | -42.75 |
| 1.059 | 1.19 | -42.82 |
| 1.343 | 1.13 | -43.15 |
| 3.000 | 0.80 | -44.75 |
| 3.462 | 0.71 | -45.10 |
| 3.834 | 0.26 | -45.27 |
| 4.777 | -0.86 | -45.00 |
| 6.060 | -2.39 | -42.92 |

Gleichgewicht der H- und V-Kräfte

(Bemessungswerte inkl. Sicherheitsbeiwerte)

| | von z | bis z | H-Komponente | V-Komponente | [kN/m] |
|--------------------------------|-------|-------|--------------|--------------|----------------|
| Erddruck: | 0.00 | 1.00 | 6.32 | 2.09 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | | | 0.00 | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | | | 8.25 | 54.00 | |
| Fußersatzkraft: | | | 73.34 | 11.84 | (δ_c) |
| Summe: | | | 87.91 | 67.93 | |
| Räumlicher Erdwid.: | 1.00 | 6.06 | -87.91 | | |
| (maßg. Reibungsanteil: | | | -27.41) | -9.08 | (δ_p) |
| (maßg. Kohäsionsanteil: | | | 0.00) | 0.00 | (δ_p) |
| Wandengewicht: | | | | 10.29 | |
| Gesamtsumme (mit Wandgewicht): | | | 0.00 | 69.14 | (nach unten) |

Nachweis der Vertikalkomp. des mobilisierten Erdwiderstandes (EAB,EB 9)

| Einwirkungen: | | V_k [kN/m] | |
|-----------------|--|--------------|----------------|
| Erddruck: | | 1.49 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | | 40.00 | |
| Wandengewicht: | | 7.62 | |
| Fußersatzkraft: | (1/2 C_v) | 4.03 | (δ_c) |
| Summe: | | 53.15 | |
| Erdwiderstand: | ($B_v - 1/2 * C_h * \tan(\delta_p)$) | -2.08 | |

Nachweis: $V_k = 53.15 \text{ kN/m} \geq B_{vk} = -2.08 \text{ kN/m}$

*** Nachweis erfüllt ***

Nachweis der Abtragung von Vertikalkräften in den Untergrund (EAB,EB 84)

| Einwirkungen: | V_d [kN/m] | |
|------------------------------|--------------|----------------|
| Erddruck: | 2.09 | (δ_a) |
| Anker/Steifen: | 0.00 | (α) |
| Einzellasten: | 54.00 | |
| Wand eigengewicht: | 10.29 | |
| Fußersatzkraft: (1/2 C_v) | -5.92 | (δ_c) |
| Summe: | 60.47 | |

| Widerstände: | R_d [kN/m] |
|--|--------------|
| Fußfläche für Spitzendruck (cm^2/m): 503.2 | |
| Spitzendruck: | 21.57 |
| Mantelreibung: | 35.20 |
| Summe: | 56.77 |

Nachweis: $V_d = 60.47 \text{ kN/m} > R_d = 56.77 \text{ kN/m}$

Die Wandlänge ist für zusätzliche Mantelreibung zu vergrößern!

| | |
|---|-------------------|
| zusätzliche Mantelfläche je m Wand: | 0.32 m^2 |
| ca. zusätzlich erforderliche Wandlänge: | 0.27 m |
| rechnerische Wandlänge: | 6.06 m |
| ca. erforderliche Wandlänge gesamt: | 6.33 m |
| ca. zusätzliche Mantelreibung: | 3.76 kN |

| Widerstände: | R_d [kN/m] |
|----------------------------|--------------|
| Spitzendruck: | 21.57 |
| Mantelreibung: | 35.20 |
| zusätzliche Mantelreibung: | 3.76 |
| Summe: | 60.52 |

Nachweis: $V_d = 60.47 \text{ kN/m} \leq R_d = 60.52 \text{ kN/m}$

***** Nachweis erfüllt *****

Geländebruch-Nachweis

Lastfall I (Typ: BS-P)

Gleitkörper von $x = -0.39$ bis 1.14 m

Gleitkreis: $x_M = 0.38$ m, $z_M = -6.44$ m, $R = 0.76$ m

Bestimmung der Lamellen-Anteile

| x_M | Breite b | Eigen- gewicht [kN/m] | Auflast [kN/m] | Wasser- auflast [kN/m] | φ [Grad] | c [kN/m ²] | ϑ [Grad] |
|---------|-------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|
| -0.16 | 0.15 | 17.32 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -44.43 |
| 0.02 | 0.09 | 2.44 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -27.35 |
| 0.15 | 0.15 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -17.46 |
| 0.30 | 0.15 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | -5.74 |
| 0.45 | 0.15 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 5.74 |
| 0.60 | 0.15 | 8.32 | 0.00 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 17.46 |
| 0.76 | 0.15 | 20.56 | 0.69 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 30.00 |
| 0.91 | 0.15 | 20.21 | 0.99 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 44.43 |
| 1.06 | 0.15 | 19.47 | 0.99 | 0.00 | 27.50 | 0.0 | 64.16 |
| x_M | | | | | | $R \cdot T_i$ | $R \cdot G^*$ $\sin(\vartheta)$ |
| [m] | | | | | | [kNm/m] | [kNm/m] |
| -0.16 | | | | | | 0.00 | 0.00 |
| 0.02 | | | | | | 1.04 | -0.86 |
| 0.15 | | | | | | 0.09 | -0.06 |
| 0.30 | | | | | | 0.11 | -0.03 |
| 0.45 | | | | | | 0.11 | 0.03 |
| 0.60 | | | | | | 2.53 | 1.90 |
| 0.76 | | | | | | 6.62 | 8.10 |
| 0.91 | | | | | | 7.26 | 11.32 |
| 1.06 | | | | | | 9.14 | 14.04 |
| Summen: | | | | | | 26.91 | 34.45 |

Einzellasten (ständig)

| H | V | M | Hebelarm H | Hebelarm V | $M_{\text{rückh.}}$ | $M_{\text{abtr.}}$ |
|--------|--------|---------|------------|------------|---------------------|--------------------|
| [kN/m] | [kN/m] | [kNm/m] | [m] | [m] | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 0.00 | 40.00 | 0.00 | 6.44 | -0.06 | 13.09 | -2.60 |

Einfluss von Bauwerken

| Gewicht | Hebelarm | φ | ϑ | $M_{\text{rückh.}}$ | $M_{\text{abtr.}}$ |
|---------|----------|-----------|-------------|---------------------|--------------------|
| [kN/m] | [m] | [Grad] | [Grad] | [kNm/m] | [kNm/m] |
| 8.90 | -0.06 | 22.61 | -4.89 | 2.91 | -0.58 |

Einwirkungen $E_d = 31.27$ kN

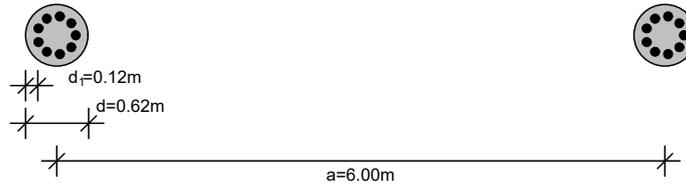
Widerstände $R_d = 42.91$ kN

$$E_d/R_d = 0.73 < 1.0$$

*** Nachweis erfüllt ***

Bemessung der Bohrpfahlwand (bis 6.06 m)

Maßstab: 1:75
Bewehrter Pfahl Beton: C20/25 500 (B)



Maßgebende Schnittgrößen (je Pfahl):

Sicherheitsbeiwerte

für Lasten: γ_F nach Nachweisverfahren 2
für Widerstände: $\gamma_R = 1.50$ (Beton), 1.15 (Stahl)

Bemessungsschnittgrößen

| | |
|----------------------|--|
| maßgebendes Moment | max. $M_d = -1.19$ kNm im Aushub E zug. $N_d = -343.82$ kN bei $z = 6.06$ m |
| maßgebendes Moment | min. $M_d = -398.25$ kNm im Aushub E zug. $N_d = -366.38$ kN bei $z = 3.75$ m |
| maßgebende Querkraft | max. $V_d = 210.82$ kN im Aushub E zug. $M_d = -27.03$ kNm zug. $N_d = -345.11$ kN bei $z = 6.00$ m |

*** Hinweis: Die Ersatzkraft C bei Einspannung nach Blum wird nach Weißenbach mit dem halben Wert angesetzt.

Biegebemessung nach DIN EN 1992 (Eurocode 2)

Materialkennwerte: Beton C20/25 Stahl 500 (B)

Durchmesser $d = 0.62$ m, $d_1 = 0.12$ m, $EI = 217.60$ MNm² (pro Pfahl)

| | |
|-----------------------------|--|
| bei max. M ($z = 6.06$ m): | Betondehnung = -2.16 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = -1.86 ‰ |
| | tot. $\omega = 0.000$ |
| | erf. Gesamtbew. $A_S = 0.00$ cm ² < Mindestbewehrung nach EN 1536 = 15.10 cm ² |

gewählt: 9 \emptyset 28 mm = 55.44 cm²

| | |
|-----------------------------|---|
| bei min. M ($z = 3.75$ m): | Betondehnung = -3.50 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = 3.54 ‰ |
| | tot. $\omega = 0.676$ |
| | erf. Gesamtbew. $A_S = 53.17$ cm ² |

gewählt: 9 \emptyset 28 mm = 55.44 cm²

Querkraftbemessung nach DIN EN 1992 (Eurocode 2)

| | |
|-----------------------------|--|
| bei max. V ($z = 6.00$ m): | $V_{Rd,max} = 232.17$ kN > $V_d = 210.82$ kN |
| | $V_{Rd,ct} = 64.40$ kN |
| | Druckstrebenneig. $\varphi = 31.1^\circ$ |
| | Betondehnung = -2.94 ‰ |
| | Dehnung Bewehrung = 25.00 ‰ |
| | erf. Schubbew. $A_{SW} = 10.32$ cm ² /m Pfahl |

gewählt: \emptyset 10 mm, Ganghöhe 12 cm = 13.09 cm²/m

Abschnittsweise Bemessung

| Tiefe [m] | Moment M_d [kNm] | Normalkraft N_d [kN] | Querkraft V_d [kN] | Biegebewehrung [cm ²] | Schubbewehrung [cm ² /m] |
|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| 0.00 | -171.00 | -324.00 | 49.50 | 11.86 # | 4.31 |
| 0.25 | -183.94 | -328.20 | 54.49 | 13.78 # | 4.31 |
| 0.50 | -198.50 | -333.40 | 62.48 | 15.96 | 4.31 |
| 0.75 | -215.43 | -339.58 | 73.45 | 18.72 | 4.31 |
| 1.00 | -235.47 | -346.76 | 87.42 | 21.95 | 4.31 |
| 1.25 | -257.16 | -349.13 | 85.80 | 25.81 | 4.31 |
| 1.50 | -278.28 | -351.39 | 82.97 | 29.68 | 4.31 |
| 1.75 | -298.56 | -353.53 | 79.07 | 33.47 | 4.31 |
| 2.00 | -317.72 | -355.57 | 74.11 | 37.01 | 4.31 |
| 2.25 | -335.52 | -357.50 | 68.09 | 40.55 | 4.31 |
| 2.50 | -351.68 | -359.31 | 61.00 | 43.84 | 4.31 |
| 2.75 | -365.93 | -361.02 | 52.85 | 46.62 | 4.31 |
| 3.00 | -378.02 | -362.61 | 43.64 | 49.04 | 4.31 |
| 3.25 | -387.66 | -364.10 | 33.36 | 50.99 | 4.31 |
| 3.50 | -394.61 | -365.47 | 21.96 | 52.38 | 4.31 |
| 3.75 | -398.25 | -366.38 | 6.11 | 53.17 | 4.31 |
| 3.83 | -398.49 | -366.45 | 0.00 | 53.16 | 4.31 |
| 4.00 | -397.14 | -366.63 | 8.03 | 52.88 | 4.31 |
| 4.25 | -389.69 | -366.23 | 22.29 | 51.47 | 4.31 |
| 4.50 | -374.32 | -365.18 | 39.72 | 48.36 | 4.31 |
| 4.75 | -349.44 | -363.47 | 60.31 | 43.22 | 4.31 |
| 5.00 | -313.48 | -361.11 | 84.08 | 36.10 | 4.31 |
| 5.25 | -264.84 | -358.09 | 111.01 | 27.02 | 4.31 |
| 5.50 | -201.94 | -354.42 | 141.11 | 16.11 | 4.31 |
| 5.75 | -123.20 | -350.09 | 174.38 | 4.41 # | 4.75 |
| 6.00 | -27.03 | -345.11 | 210.82 | 0.00 # | 10.32 |
| 6.06 | -1.19 | -343.82 | 220.03 | 0.00 # | 6.15 |

= Biegebewehrung < Mindestbewehrung nach EN 1536 = 15.10 cm²

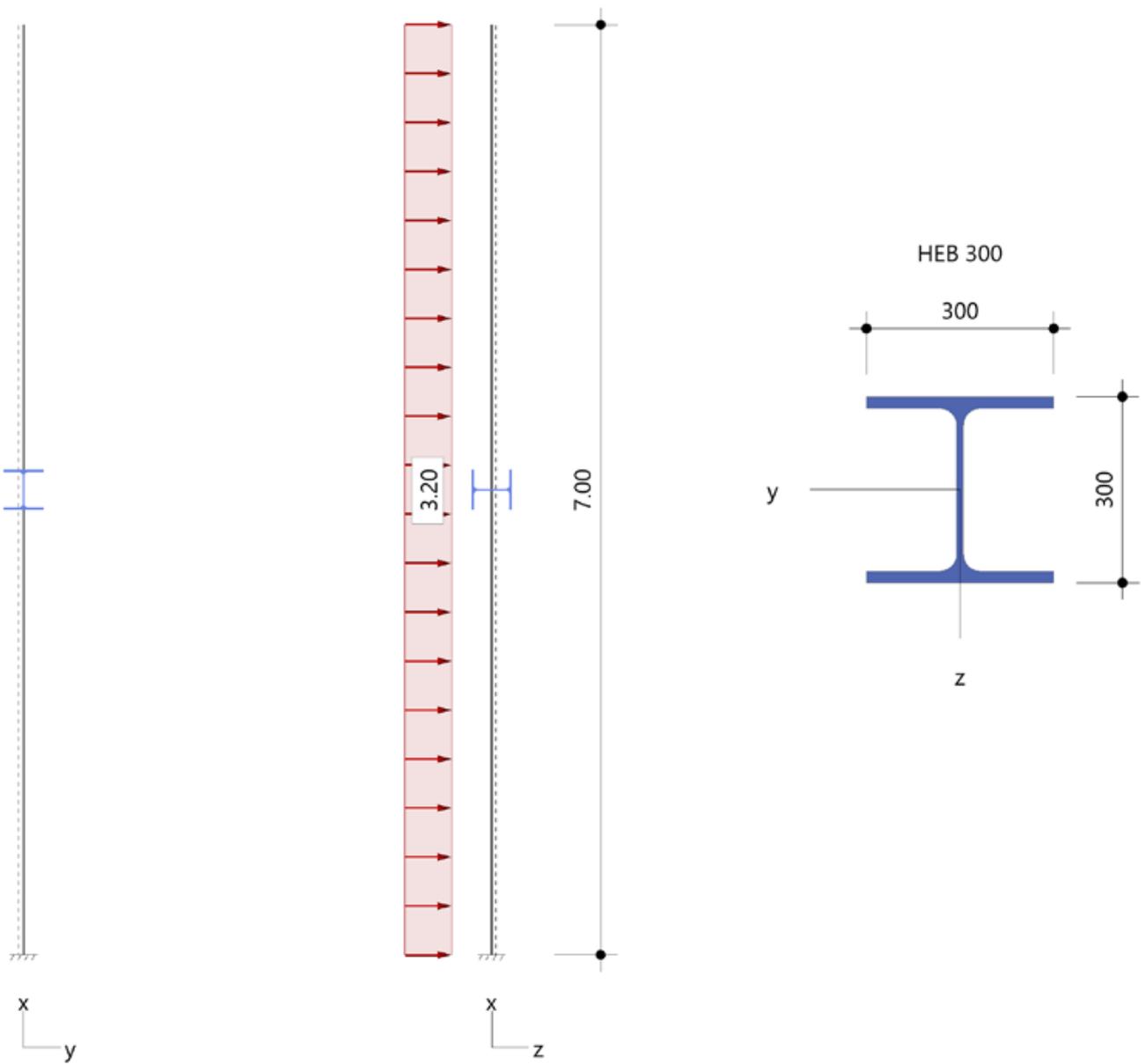
Position: (Neue Position)

Stahlstütze STS+ 01/2021 (FRILO R-2021-1)

Grundparameter

| | | |
|---|------------------|---|
| Bemessungsnorm | : | DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08 |
| Sicherheitskonzept/Lastkombinatorik | : | DIN EN 1990/NA:2010-12 |
| $\Psi_2 = 0.5$ für Schnee (AE) | : | nicht angesetzt |
| Kombination ständiger Lasten | : | alle gleiches γ_F ($\gamma_{G,sup}$ oder $\gamma_{G,inf}$) |
| Querschnittsbemessung | : | plastisch |
| Stabilitätsnachweis nach | : | 6.3.3 - Anhang B |
| Bemessungssituation Gebrauchstauglichkeit | : | charakteristisch |
| Nachweis Absolutverformung mit | $\delta_{lim} =$ | 5.0 cm |
| Nachweis Relativverformung (Durchbiegung) mit | $\delta_{lim} =$ | $l_{eff} / 300$ |

System Kragstütze



Stütze: Höhe = 7.00 m Material: S235 Querschnitt: HEB 300

Lagerbedingungen

| Nr | x [m] | Verschiebungen *) | | | Verdrehungen *) | | |
|----|----------|-------------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | ux [kN/m] | uy [kN/m] | uz [kN/m] | Φ_x [kNm/rad] | Φ_y [kNm/rad] | Φ_z [kNm/rad] |
| 1 | 0.00 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

Belastung

Einwirkungen(Ew)

| Id | Typ | Bemessungssituation | Name | γ_{sup} | γ_{inf} | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|----|-----|-----------------------|------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| 99 | G | ständig/vorübergehend | ständig | 1.35 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 9 | Q | ständig/vorübergehend | Windlasten | 1.50 | 0.00 | 0.60 | 0.20 | 0.00 |

Lasten

Lastarten

Art 2 = Gleichstreckenlast kN/m
Das Eigengewicht wird automatisch berücksichtigt.

Standard-Lastfälle und Lasten

| Nr | Art | in/um | pi | a [m] | pj | l [m] | ey [mm] | ez [mm] | Ew | Zus |
|----|-----|---------------|------|----------|----|----------|------------|------------|----|-----|
| 1 | 2 | in z-Richtung | 3.20 | - | - | - | - | -150 | 9 | 110 |

Ergebnisse

Tragfähigkeit - Lastkombination ständige/vorübergehende Bemessungssituation

Schnittgrößen - Lfk 1

| x [m] | N_{Ed} [kN] | $V_{z,Ed}$ [kN] | $M_{y,Ed}$ [kNm] | $V_{y,Ed}$ [kN] | $M_{z,Ed}$ [kNm] |
|----------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 0.00 | -11.1 | 33.6 | -117.60 | 0.0 | 0.00 |
| 7.00 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |

Querschnittstragfähigkeit nach Abschnitt 6.2 ff - Lfk 1 - $\gamma_{M0} = 1,00$

| x [m] | Qkl | η_N | η_{Vz} | η_{My} | η_{Vy} | η_{Mz} | η_{MyMz} | η |
|----------|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------|
| 0.00 | 1 | 0.00 | 0.05 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 0.27 |
| 7.00 | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Stabilitätsnachweis

| x [m] | Qkl | N_{Ed} [kN] | $M_{y,Ed}$ [kNm] | Gl | η | Lfk |
|----------|-----|------------------|---------------------|------|--------|-----|
| 0.00 | 1 | 11.0 | 117.60 | 6.62 | 0.30 | 1 |

Gebrauchstauglichkeit - Lastkombination charakteristisch

Verformungsnachweis - Absolutverformung $f_{cd} = 5.0$ cm

| x [m] | $f_{x,Ed}$ [cm] | $f_{y,Ed}$ [cm] | $f_{z,Ed}$ [cm] | $f_{res,Ed}$ [cm] | η | Lfk |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------|-----|
| 7.00 | 0.0 | 0.0 | 1.8 | 1.8 | 0.36 | 5 |

Verformungsnachweis - Relativverformung in z $f_{cd} = l_{eff}/300$

| x [m] | l_{eff} [m] | $l_{eff,x0}$ [m] | $l_{eff,x1}$ [m] | $f_{z,Ed}$ [cm] | $f_{z,Cd}$ [cm] | η | Lfk |
|----------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------|-----|
| 2.58 | 7.00 | 0.00 | 7.00 | 0.3 | 2.3 | 0.12 | 5 |

Auflagerkräfte

Auflagerkräfte - charakteristisch je Lastfall

| Lager | x [m] | Lf | Ew | R _x [kN] | R _z [kN] | M _y [kNm] | R _y [kN] | M _z [kNm] |
|-------|-------|------------------------------------|---------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Fuss | 0.00 | Eigengewicht Lasten mit Zus 110 | 99 9 | -8.2 - | - 22.4 | - -78.40 | - - | - - |

Übersicht maßgeblicher Lastfallkombinationen

| Lfk | Bemessungssituation | [Last:Faktor] |
|--------|---|---|
| 1 5 | ständig/vorübergehend charakteristisch | Eigengewicht:1.35 + 1:1.5 Eigengewicht:1.0 + 1:1.0 |

Zusammenfassung

| Nachweis | Bemessungssituation | Querschnitt | Stabilität | Verformung |
|--|---|-------------|------------|------------|
| Tragfähigkeit Gebrauchstauglichkeit | ständig/vorübergehend charakteristisch | 0.27 | 0.30 | 0.36 |

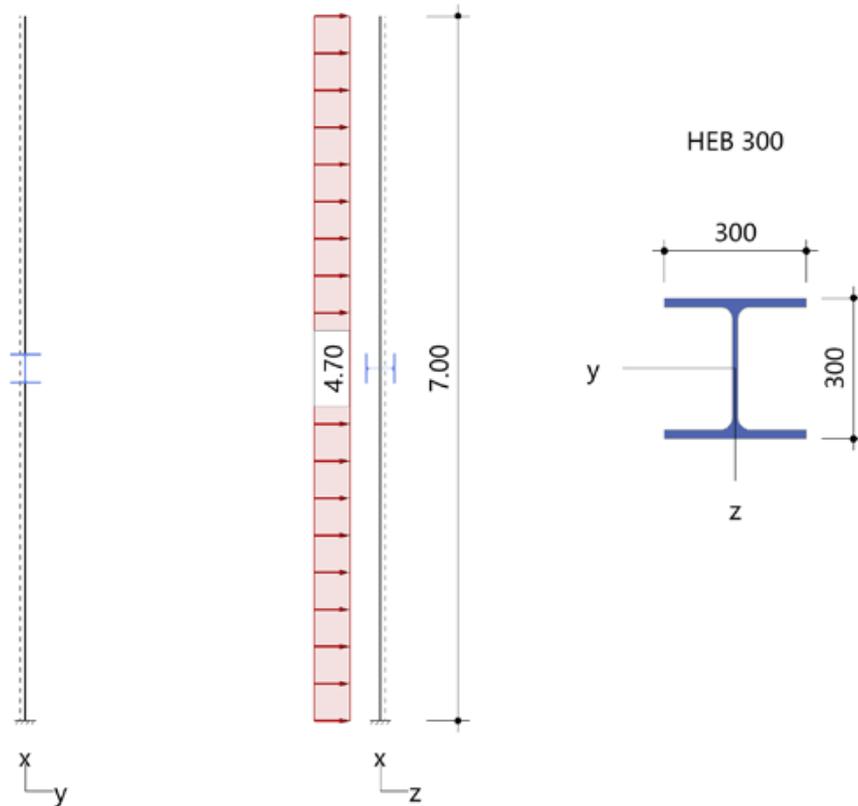
Position: (Neue Position)

Stahlstütze STS+ 01/2021 (FRILO R-2021-1)

Grundparameter

| | | |
|---|------------------|---|
| Bemessungsnorm | : | DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08 |
| Sicherheitskonzept/Lastkombinatorik | : | DIN EN 1990/NA:2010-12 |
| $\Psi_2 = 0.5$ für Schnee (AE) | : | nicht angesetzt |
| Kombination ständiger Lasten | : | alle gleiches γ_F ($\gamma_{G,sup}$ oder $\gamma_{G,inf}$) |
| Querschnittsbemessung | : | plastisch |
| Stabilitätsnachweis nach | : | 6.3.3 - Anhang B |
| Bemessungssituation Gebrauchstauglichkeit | : | charakteristisch |
| Nachweis Absolutverformung mit | $\delta_{lim} =$ | 5.0 cm |
| Nachweis Relativverformung (Durchbiegung) mit | $\delta_{lim} =$ | $l_{eff} / 300$ |

System Kragstütze



Stütze: Höhe = 7.00 m Material: S235 Querschnitt: HEB 300

Lagerbedingungen

| Nr | x [m] | Verschiebungen *) | | | Verdrehungen *) | | |
|----|----------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | u_x [kN/m] | u_y [kN/m] | u_z [kN/m] | Φ_x [kNm/rad] | Φ_y [kNm/rad] | Φ_z [kNm/rad] |
| 1 | 0.00 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

Belastung

Einwirkungen(Ew)

| Id | Typ | Bemessungssituation | Name | γ_{sup} | γ_{inf} | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|----|-----|-----------------------|------------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| 99 | G | ständig/vorübergehend | ständig | 1.35 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 9 | Q | ständig/vorübergehend | Windlasten | 1.50 | 0.00 | 0.60 | 0.20 | 0.00 |

Lasten

Lastarten

Art 2 = Gleichstreckenlast kN/m
Das Eigengewicht wird automatisch berücksichtigt.

Standard-Lastfälle und Lasten

| Nr | Art | in/um | pi | a [m] | pj | l [m] | ey [mm] | ez [mm] | Ew | Zus |
|----|-----|---------------|------|-------|----|-------|---------|---------|----|-----|
| 1 | 2 | in z-Richtung | 4.70 | - | | - | | -150 | 9 | 110 |

Ergebnisse

Tragfähigkeit - Lastkombination ständige/vorübergehende Bemessungssituation

Schnittgrößen - Lfk 1

| x [m] | N _{Ed} [kN] | V _{z,Ed} [kN] | M _{y,Ed} [kNm] | V _{y,Ed} [kN] | M _{z,Ed} [kNm] |
|-------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0.00 | -11.1 | 49.3 | -172.72 | 0.0 | 0.00 |
| 7.00 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |

Querschnittstragfähigkeit nach Abschnitt 6.2 ff - Lfk 1 - $\gamma_{M0} = 1,00$

| x [m] | Qkl | η_N | η_{Vz} | η_{My} | η_{Vy} | η_{Mz} | η_{MyMz} | η |
|-------|-----|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------|
| 0.00 | 1 | 0.00 | 0.08 | 0.39 | 0.00 | 0.00 | 0.39 | 0.39 |
| 7.00 | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Stabilitätsnachweis

| x [m] | Qkl | N _{Ed} [kN] | M _{y,Ed} [kNm] | Gl | η | Lfk |
|-------|-----|----------------------|-------------------------|------|--------|-----|
| 0.00 | 1 | 11.0 | 172.73 | 6.62 | 0.44 | 1 |

Gebrauchstauglichkeit - Lastkombination charakteristisch

Verformungsnachweis - Absolutverformung $f_{cd} = 5.0$ cm

| x [m] | f _{x,Ed} [cm] | f _{y,Ed} [cm] | f _{z,Ed} [cm] | f _{res,Ed} [cm] | η | Lfk |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------|-----|
| 7.00 | 0.0 | 0.0 | 2.7 | 2.7 | 0.53 | 5 |

Verformungsnachweis - Relativverformung in z $f_{cd} = l_{eff}/300$

| x [m] | l_{eff} [m] | $l_{eff,x0}$ [m] | $l_{eff,x1}$ [m] | f _{z,Ed} [cm] | f _{z,Cd} [cm] | η | Lfk |
|-------|---------------|------------------|------------------|------------------------|------------------------|--------|-----|
| 2.58 | 7.00 | 0.00 | 7.00 | 0.4 | 2.3 | 0.18 | 5 |

Auflagerkräfte

Auflagerkräfte - charakteristisch je Lastfall

| Lager | x [m] | Lf | Ew | R _x [kN] | R _z [kN] | M _y [kNm] | R _y [kN] | M _z [kNm] |
|-------|-------|------------------------------------|---------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Fuss | 0.00 | Eigengewicht Lasten mit Zus 110 | 99 9 | -8.2 - | - 32.9 | - -115.15 | - - | - - |

Übersicht maßgeblicher Lastfallkombinationen

| Lfk | Bemessungssituation | [Last:Faktor] |
|-----|-----------------------|---------------------------|
| 1 | ständig/vorübergehend | Eigengewicht:1.35 + 1:1.5 |
| 5 | charakteristisch | Eigengewicht:1.0 + 1:1.0 |

Zusammenfassung

| Nachweis | Bemessungssituation | Querschnitt | Stabilität | Verformung |
|--|---|-------------|------------|------------|
| Tragfähigkeit Gebrauchstauglichkeit | ständig/vorübergehend charakteristisch | 0.39 | 0.44 | 0.53 |

Akustische Messungen

Schallabsorptionsgrad nach EN-ISO 354-2003 Messung der Schallabsorption im Hallraum

Auftraggeber: Prof. Heiner Lippe
TH Lübeck

Prüfgegenstand: Wellerlehm-Platten, ca. 10 cm dick, starkes Fugenbild

Aufbau (von oben):
- 10 cm Wellerlehm
- Hallraumboden

36 Lehmplatten im Format ca. 500 x 500 x 10 mm wurden zu einem zusammenhängenden Rechteck im Format 3.016 x 3.551 mm auf dem Hallraumboden ausgelegt. Die Fugen zwischen den Platten wurden nicht bearbeitet, dadurch ergab sich ein starkes Fugenbild. Der Prüfling wurde seitlich mit Holzleisten abgedeckt. Undichtigkeiten wurden mit Terostat abgeschlossen.

Raum: Hallraum der Technischen Hochschule Lübeck

Volumen: 186,4 m³ Prüffläche: 10,50 m² Prüfdatum: 21.07.2020

leer: Temperatur: 21,3 °C rel. Luftfeuchte: 63,5 %

mit Probe: Temperatur: 20,7 °C rel. Luftfeuchte: 66,5 %

| f [Hz] | α_s | α_p |
|--------|------------|------------|
| 100 | 0,04 | 0,1 |
| 125 | 0,10 | |
| 160 | 0,16 | |
| 200 | 0,25 | 0,3 |
| 250 | 0,29 | |
| 315 | 0,31 | |
| 400 | 0,34 | 0,35 |
| 500 | 0,35 | |
| 630 | 0,35 | |
| 800 | 0,32 | |
| 1000 | 0,31 | 0,3 |
| 1250 | 0,33 | |
| 1600 | 0,35 | |
| 2000 | 0,36 | 0,35 |
| 2500 | 0,38 | |
| 3150 | 0,38 | |
| 4000 | 0,39 | 0,4 |
| 5000 | 0,39 | |

α_s : Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 354

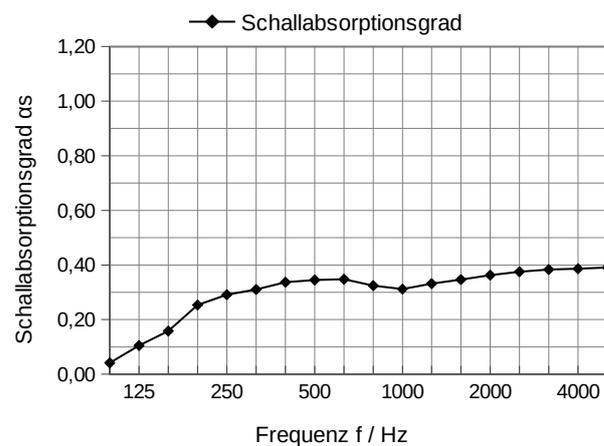
α_p : praktischer Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654

Bewertung nach ISO 11654:

Bewerteter Schallabsorptionsgrad $\alpha_w = 0,35$
Schallabsorberklasse: D

SAA nach ASTM C 432-08:

Sound Absorption Average 0,33
Noise Reduction Coefficient (NRC) 0,35



Institut für Akustik an der TH Lübeck
VMPA Prüfstelle nach DIN 4109

Lübeck, den 06.08.2020 Anhang A
Prüfbericht HL20-1 Seite 1/1

Auswertung der Messreihe 1 (siehe Abschnitt 11.1.1.1 auf Seite 74)

Schallabsorptionsgrad nach EN-ISO 354-2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

Auftraggeber: Prof. Heiner Lippe
TH Lübeck

Prüfgegenstand: Wellerlehm-Platten, ca. 10 cm dick, Fugen verfüllt mit Wellerlehm

Aufbau (von oben):
- 10 cm Wellerlehm
- Hallraumboden

36 Lehmplatten im Format ca. 500 x 500 x 10 mm wurden zu einem zusammenhängenden Rechteck im Format 3.016 x 3.551 mm auf dem Hallraumboden ausgelegt. Die Fugen zwischen den Platten wurden mit Wellerlehm verfüllt. Der Prüfling wurde seitlich mit Holzleisten abgedeckt. Undichtigkeiten wurden mit Terostat abgeschlossen.

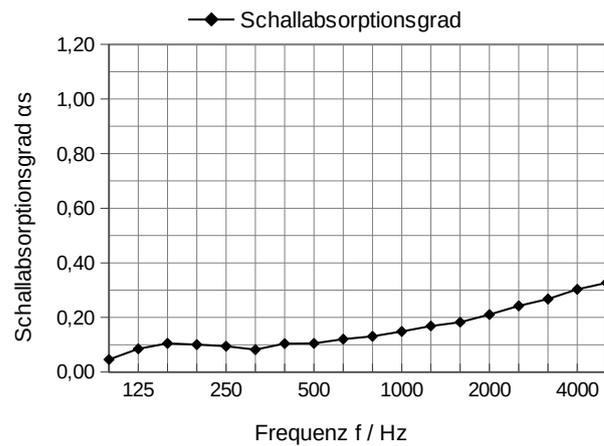
Raum: Hallraum der Technischen Hochschule Lübeck

Volumen: 186,4 m³ Prüffläche: 10,50 m² Prüfdatum: 21.07.2020

leer: Temperatur: 21,3 °C rel. Luftfeuchte: 63,5 %

mit Probe: Temperatur: 21,3 °C rel. Luftfeuchte: 65,9 %

| f [Hz] | α_s | α_p |
|--------|------------|------------|
| 100 | 0,05 | |
| 125 | 0,08 | 0,1 |
| 160 | 0,11 | |
| 200 | 0,10 | |
| 250 | 0,09 | 0,1 |
| 315 | 0,08 | |
| 400 | 0,10 | |
| 500 | 0,10 | 0,1 |
| 630 | 0,12 | |
| 800 | 0,13 | |
| 1000 | 0,15 | 0,15 |
| 1250 | 0,17 | |
| 1600 | 0,18 | |
| 2000 | 0,21 | 0,2 |
| 2500 | 0,24 | |
| 3150 | 0,27 | |
| 4000 | 0,30 | 0,3 |
| 5000 | 0,33 | |



α_s : Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 354

α_p : praktischer Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654

Bewertung nach ISO 11654:

Bewerteter Schallabsorptionsgrad $\alpha_w = 0,15$
Schallabsorberklasse: E (H)

SAA nach ASTM C 432-08:

Sound Absorption Average 0,14
Noise Reduction Coefficient (NRC) 0,15

Institut für Akustik an der TH Lübeck
VMPA Prüfstelle nach DIN 4109

Lübeck, den 06.08.2020 Anhang A
Prüfbericht HL20-2 Seite 1/1

Auswertung der Messreihe 2 (siehe Abschnitt 11.1.1.1 auf Seite 74)

Schallabsorptionsgrad nach EN-ISO 354-2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

Auftraggeber: Prof. Heiner Lippe
TH Lübeck

Prüfgegenstand: Stampflehm, manuell verdichtet auf ca. 5 cm Dicke, erdfeucht

Aufbau (von oben):
- ca. 5 cm Stampflehm, erdfeucht
- Hallraumboden

In einem rechteckigen Holzrahmen auf dem Hallraumboden im Format 3.016 x 3.551 mm wurden ca. 1,6 to Stampflehm eingebracht und manuell auf ca. 5 cm Dicke verdichtet. Undichtigkeiten zwischen dem Rahmen und dem Hallraumboden wurden mit Terostat abgeschlossen.

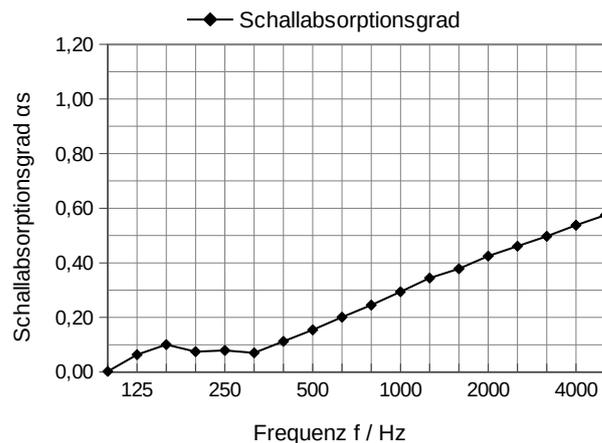
Raum: Hallraum der Technischen Hochschule Lübeck

Volumen: 186,4 m³ Prüffläche: 10,50 m² Prüfdatum: 23.07.2020

leer: Temperatur: 22,6 °C rel. Luftfeuchte: 53,4 %

mit Probe: Temperatur: 22,0 °C rel. Luftfeuchte: 58,9 %

| f [Hz] | α_s | α_p |
|--------|------------|------------|
| 100 | 0,00 | |
| 125 | 0,06 | 0,05 |
| 160 | 0,10 | |
| 200 | 0,07 | |
| 250 | 0,08 | 0,05 |
| 315 | 0,07 | |
| 400 | 0,11 | |
| 500 | 0,15 | 0,15 |
| 630 | 0,20 | |
| 800 | 0,25 | |
| 1000 | 0,29 | 0,3 |
| 1250 | 0,34 | |
| 1600 | 0,38 | |
| 2000 | 0,42 | 0,4 |
| 2500 | 0,46 | |
| 3150 | 0,50 | |
| 4000 | 0,54 | 0,55 |
| 5000 | 0,57 | |



α_s : Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 354

α_p : praktischer Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654

| | |
|---|-------|
| Bewertung nach ISO 11654: | |
| Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w = | 0,25 |
| Schallabsorberklasse: | E (H) |

| | |
|-----------------------------------|------|
| SAA nach ASTM C 432-08: | |
| Sound Absorption Average | 0,24 |
| Noise Reduction Coefficient (NRC) | 0,25 |

Institut für Akustik an der TH Lübeck
VMPA Prüfstelle nach DIN 4109

Lübeck, den 06.08.2020 Anhang A
Prüfbericht HL20-3 Seite 1/1

Auswertung der Messreihe 3 (siehe Abschnitt 11.1.1.2 auf Seite 75)

Schallabsorptionsgrad nach EN-ISO 354-2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

Auftraggeber: Prof. Heiner Lippe
TH Lübeck

Prüfgegenstand: Stampflehm, manuell verdichtet auf ca. 5 cm Dicke, etwas getrocknet

Aufbau (von oben):

- ca. 5 cm Stampflehm, etwas getrocknet
- Hallraumboden

In einem rechteckigen Holzrahmen auf dem Hallraumboden im Format 3.016 x 3.551 mm wurden ca. 1,6 t Stampflehm eingebracht und manuell auf ca. 5 cm Dicke verdichtet. Die Messung wurde nach 7 Tagen Trocknungszeit im Hallraum durchgeführt. Undichtigkeiten zwischen dem Rahmen und dem Hallraumboden wurden mit Terostat abgeschlossen.

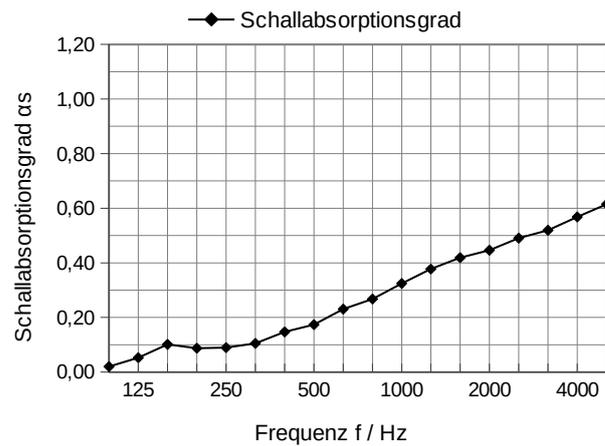
Raum: Hallraum der Technischen Hochschule Lübeck

Volumen: 186,4 m³ Prüffläche: 10,50 m² Prüfdatum: 30.07.2020

leer: Temperatur: 22,6 °C rel. Luftfeuchte: 53,4 %

mit Probe: Temperatur: 21,1 °C rel. Luftfeuchte: 63,4 %

| f [Hz] | α_s | α_p |
|--------|------------|------------|
| 100 | 0,02 | |
| 125 | 0,05 | 0,05 |
| 160 | 0,10 | |
| 200 | 0,09 | |
| 250 | 0,09 | 0,1 |
| 315 | 0,11 | |
| 400 | 0,15 | |
| 500 | 0,17 | 0,2 |
| 630 | 0,23 | |
| 800 | 0,27 | |
| 1000 | 0,32 | 0,3 |
| 1250 | 0,38 | |
| 1600 | 0,42 | |
| 2000 | 0,45 | 0,45 |
| 2500 | 0,49 | |
| 3150 | 0,52 | |
| 4000 | 0,57 | 0,55 |
| 5000 | 0,61 | |



α_s : Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 354

α_p : praktischer Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654

Bewertung nach ISO 11654:

Bewerteter Schallabsorptionsgrad $\alpha_w = 0,30$
Schallabsorberklasse: D (H)

SAA nach ASTM C 432-08:

Sound Absorption Average 0,26
Noise Reduction Coefficient (NRC) 0,25

Institut für Akustik an der TH Lübeck
VMPA Prüfstelle nach DIN 4109

Lübeck, den 06.08.2020 Anhang A
Prüfbericht HL20-4 Seite 1/1

Auswertung der Messreihe 4 (siehe Abschnitt 11.1.1.2 auf Seite 75)

Technische Zeichnungen

Trägerwand Stampflehm Gründung 45 cm Wandstärke, 7 m Höhe

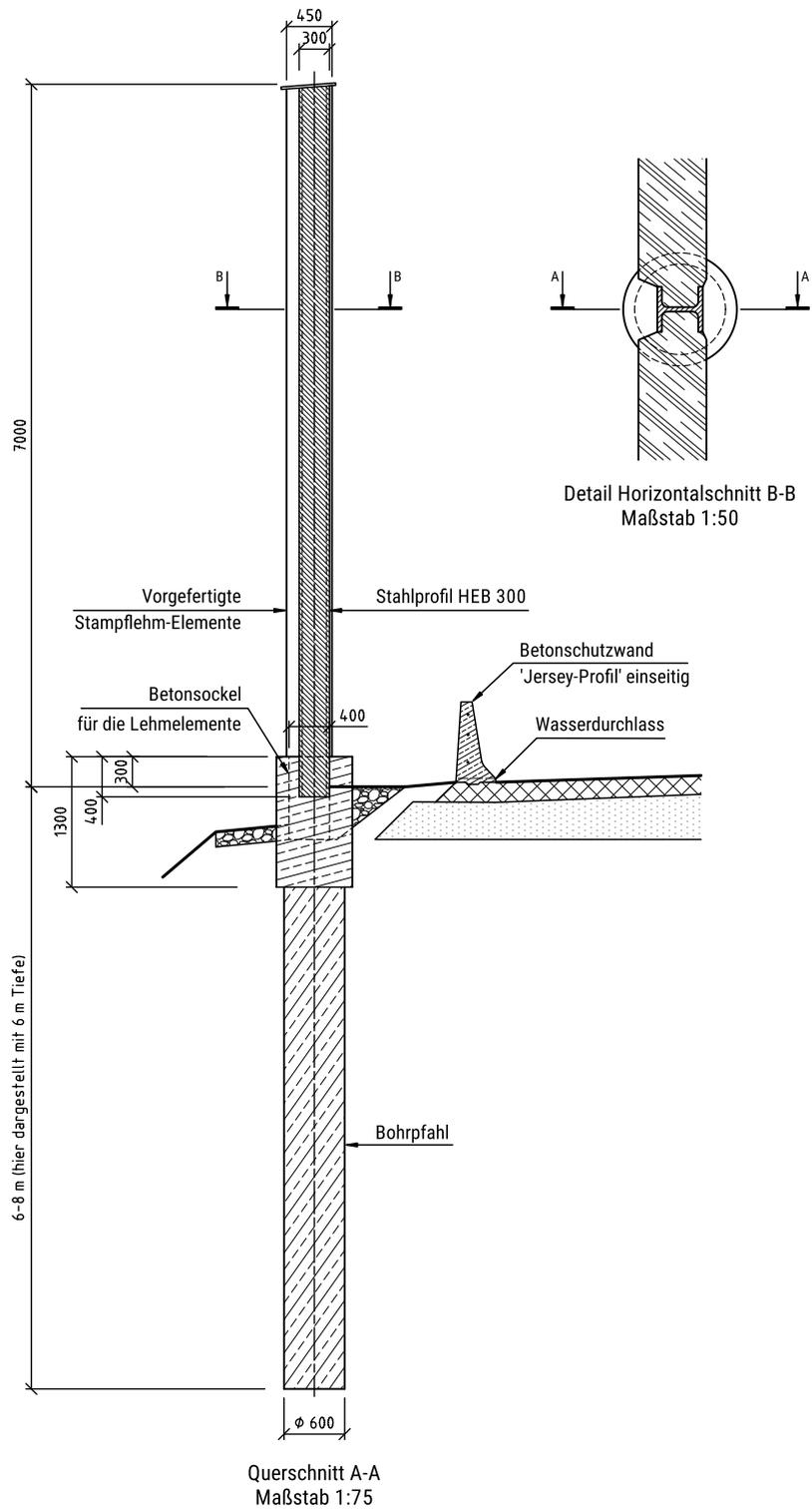
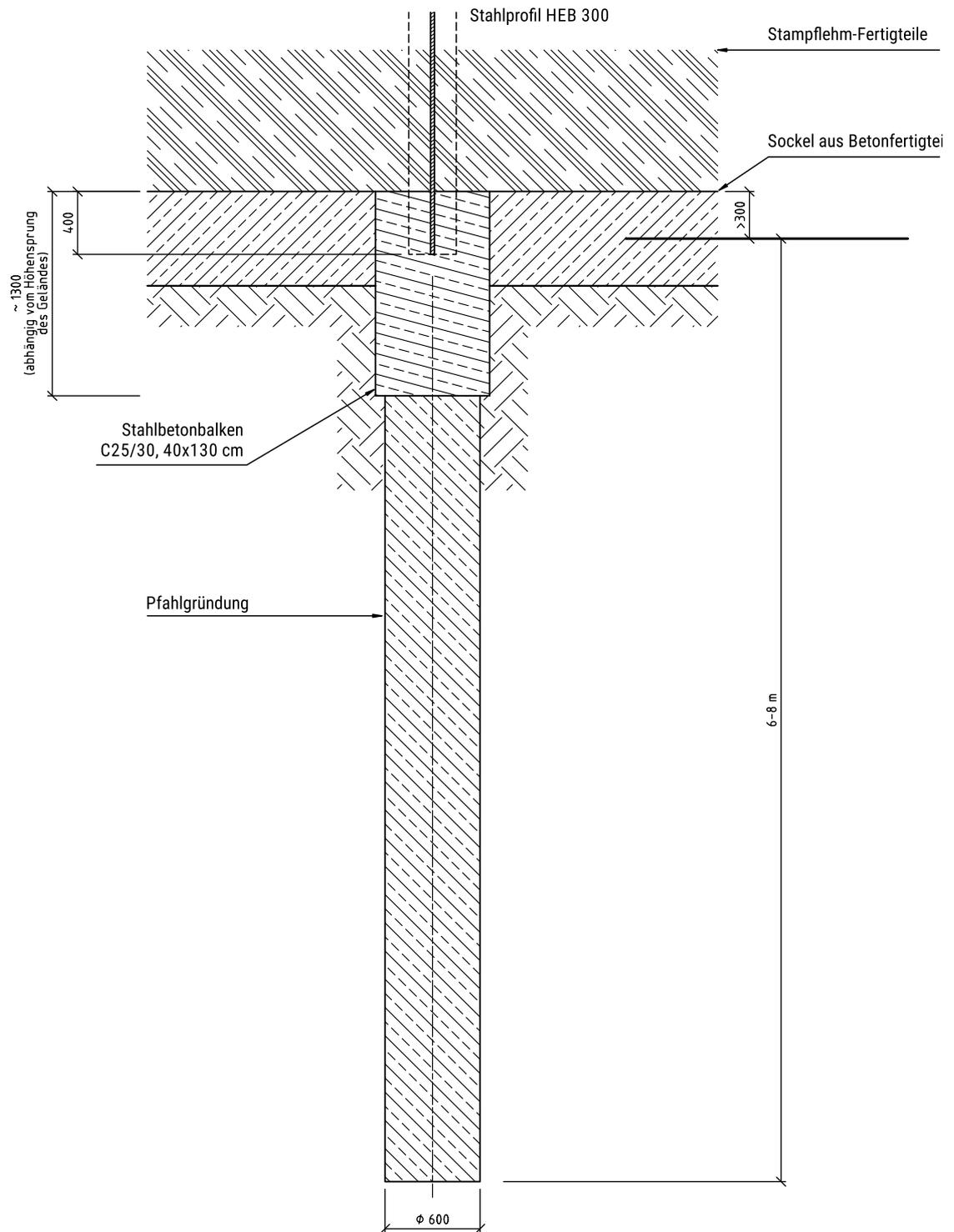


Abb. A1 Querschnitt Trägerwandsystem

Bohrpfahlfundament für eine Stampflehm-Trägerwand (Längsschnitt entlang der Wandmitte)

Maßstab 1:40



Bohrpfahl \varnothing 600, Tiefe 6-8 m (hier Mindesttiefe von 6 m dargestellt)
C20/25

Trägerwand Abdeckung
Detail 1 Vertikal-Längsschnitt C-C
Maßstab 1:10

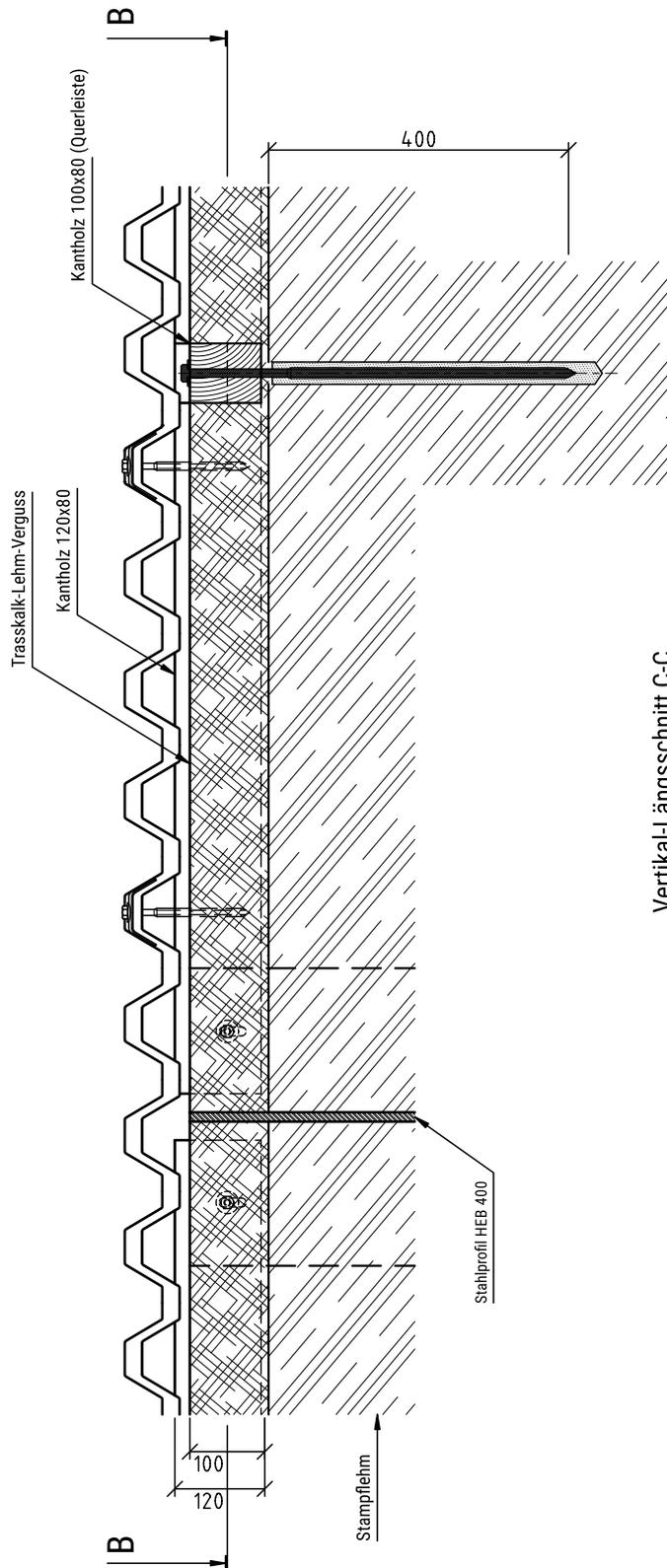
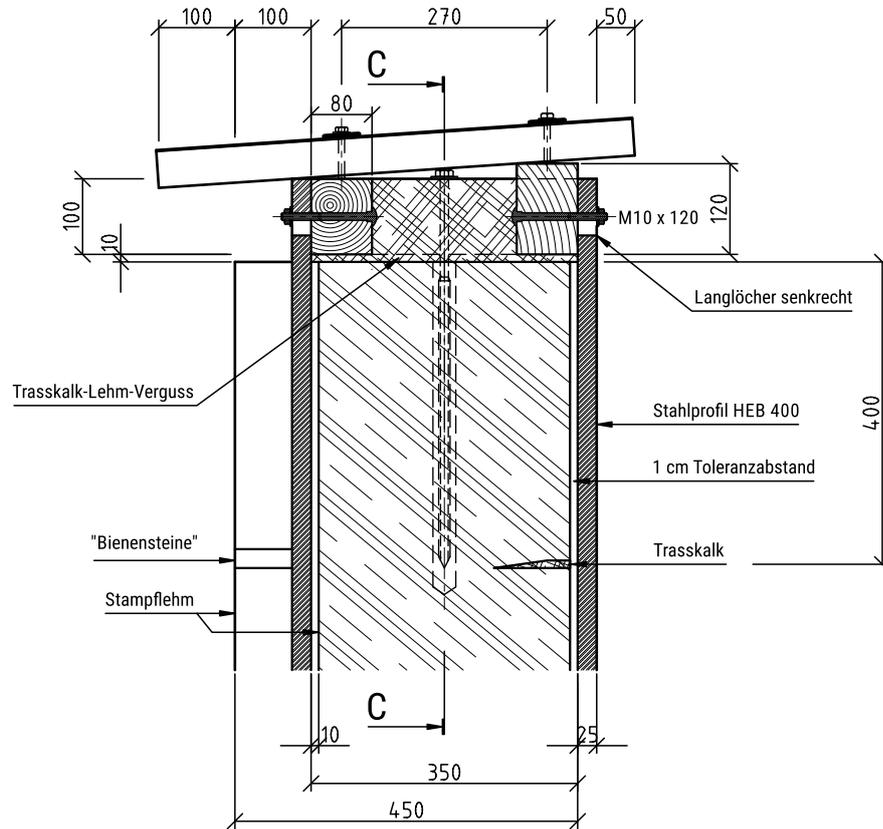


Abb. A3 Längsschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung

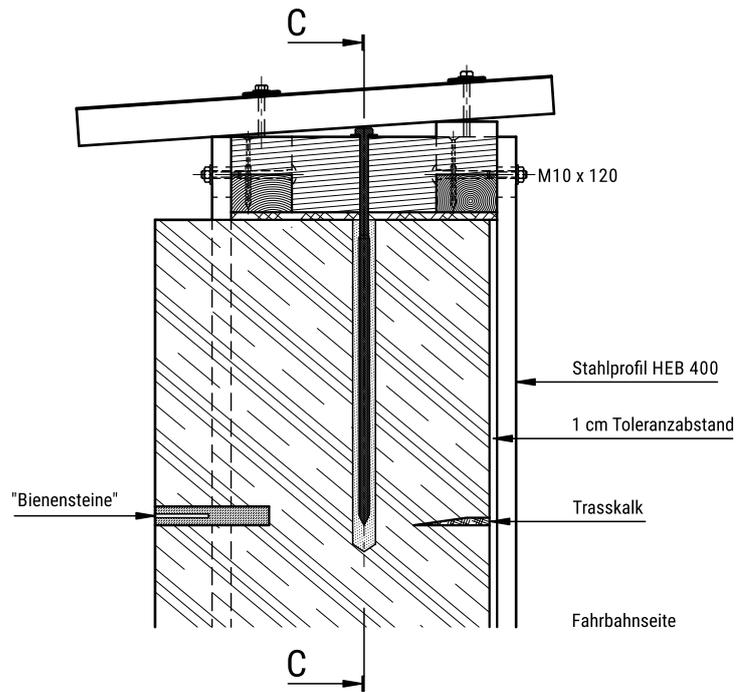
Trägerwand Abdeckung
Detail 2 Querschnitt A-A
Maßstab 1:10



Querschnitt A-A

Abb. A4 Querschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung

Trägerwand Abdeckung
Detail 3 Querschnitt A'-A'
Maßstab 1:10



Querschnitt A'-A'

Abb. A5 Querschnitt Trägerwand; Detail Abdeckung

Trägerwand Abdeckung
Detail 2 Horizontalschnitt B-B
Maßstab 1:10

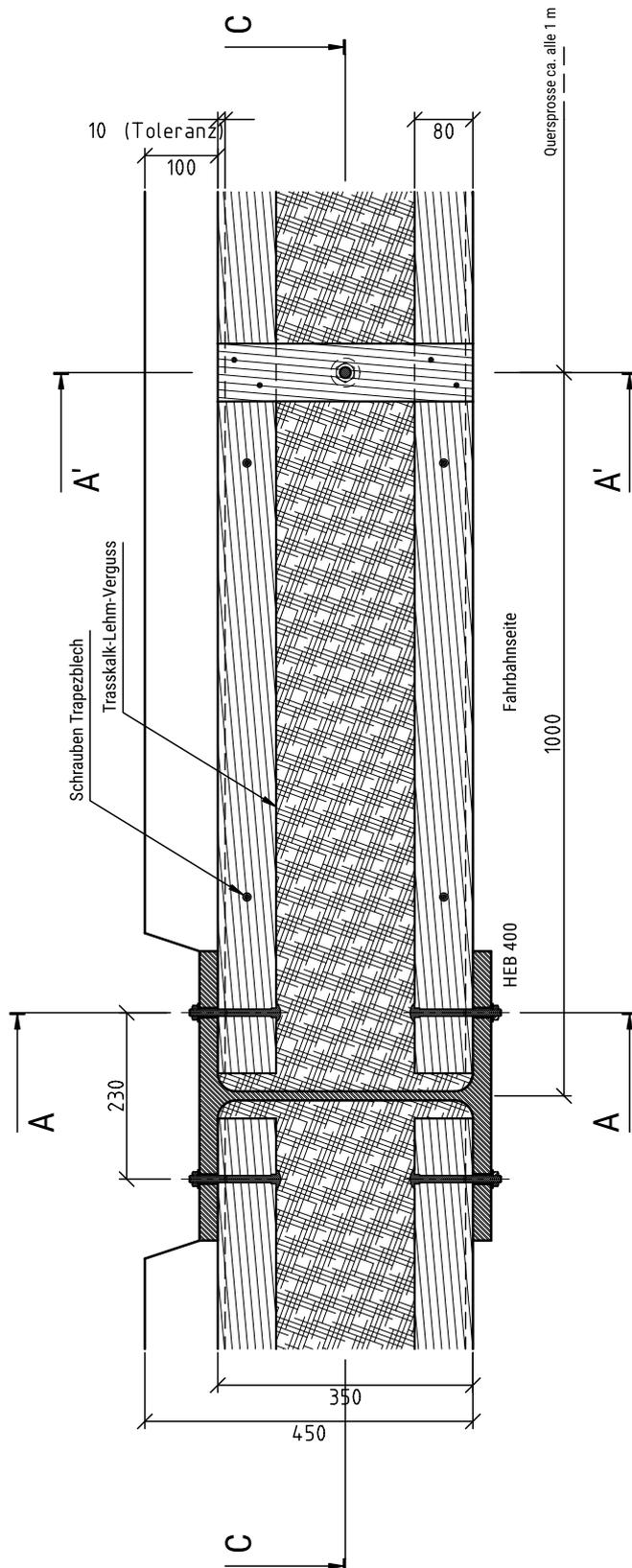
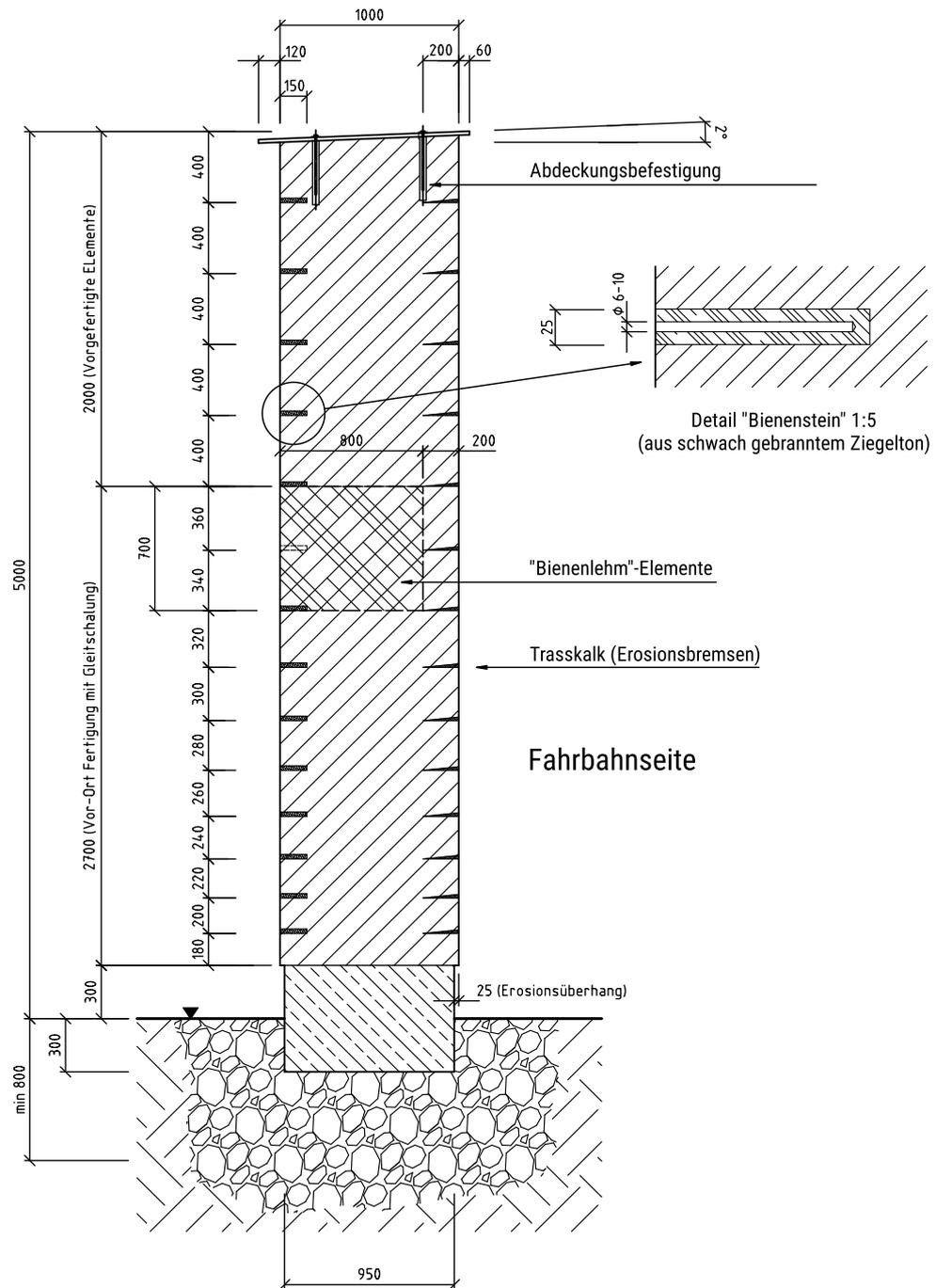


Abb. A6 Horizontalschnitt Trägerwand, Detail Abdeckung

Stampflehm-Schwerlastwand 5 m Höhe Querschnitt

Maßstab 1:40

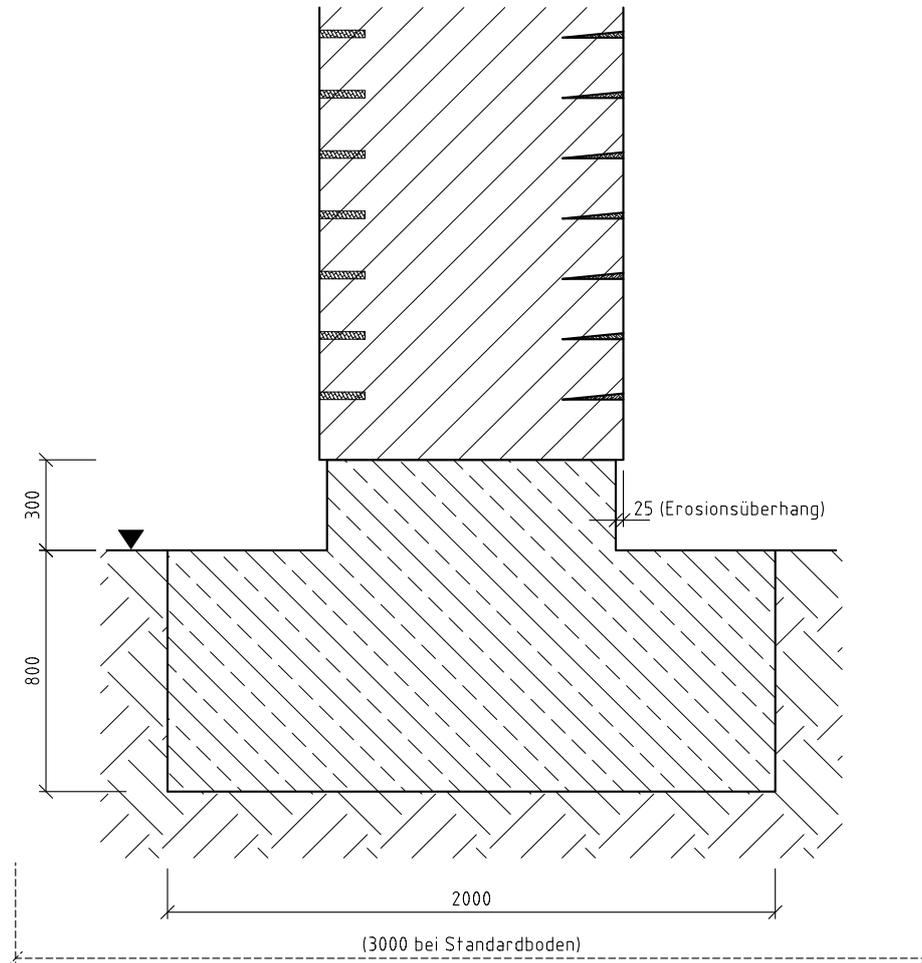


Betonsparende Fundamentvariante mit
StB C25/30 und frostsicherem Bodenaustausch

Abb. A7 Querschnitt Stampflehm-Schwerlastwand mit betonsparender Gründung

Alternative Fundamentierung für eine Schwerlastwand (hier: Stampflehm)

Maßstab 1:20

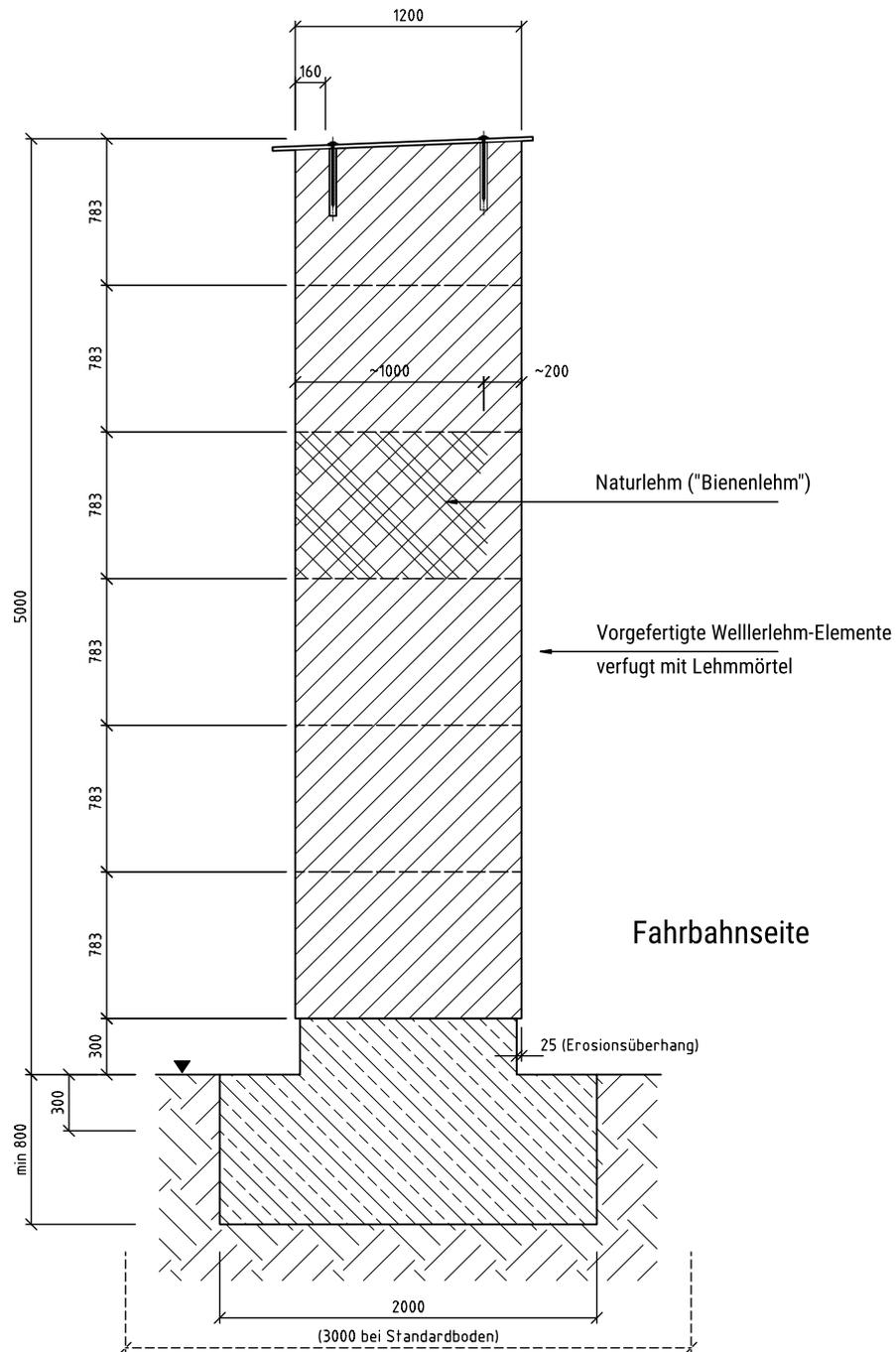


StB C25/30
(Breite des Fundaments ist je nach Bodenbeschaffenheit zu optimieren)

Abb. A8 Querschnitt Stampflehm-Schwerlastwand, alternative Gründung

Wellerlehm-Schwerlastwand 5 m Höhe Querschnitt

Maßstab 1:40



StB C25/30

(Breite des Fundaments ist je nach Bodenbeschaffenheit zu optimieren)

Abb. A9 Querschnitt Wellerlehm-Schwerlastwand

Studie zur Vorfertigung von Wellerlehmelementen

Gehört zu Kapitel „6.4.4. Prozessparameter und Kinematikstudien für die Konzipierung einer Maschine zur Herstellung von Blöcken aus Wellerlehm“ auf Seite 46

PROZESSPARAMETER UND KINEMATIKSTUDIEN FÜR DIE KONZIPIERUNG EINER MASCHINE ZUR HERSTELLUNG VON BLÖCKEN AUS WELLERLEHM

1 VORWORT

Aus den Vorüberlegungen, den Besichtigungen und Gesprächen wurde beschlossen, die Konzeption einer Maschine die Wellerlehmblöcke erstellen könnte, grundsätzlich zu überdenken. Dazu sind dann unter maßgeblicher Mitwirkung des Kollegen Prof. Dr. Nils Kohlhasse und seines Studierenden und Bachelorabsolvierenden Mohamad Saleh, beide aus dem Fachbereich Maschinenbau und Wirtschaft der Technischen Hochschule Lübeck, folgenden grundsätzliche Überlegungen an der TH Lübeck erstellt worden. In vielen Arbeitssitzungen am Bildschirm, vor Ort und im Labor und an den Prüfständen der Materialprüfanstalt Schleswig-Holstein, gemeinsam mit den weiteren Studierenden Inken Bork, Urs Seel sowie Paul Tschense sowie Prof. Heiner Lippe sind Erkenntnisse gesammelt worden, die hier ihren Niederschlag finden. Diese sind als weiterer Baustein der Machbarkeitsstudie zur Lehmlärmschutzwand an der A14 zu betrachten, geben hier eine weitere Orientierung.

2 EINLEITUNG

Lehm ist ein sehr umweltschonender Baustoff. Im Vergleich zu Baustoffen wie Beton, gebrannten Kunststeinen oder Stahl beschränkt sich der Ressourcenverbrauch auf ein Minimum. Insbesondere für die Gewinnung, den Transport und die Weiterverarbeitung ist der erforderliche Energieeinsatz relativ gering. Zudem ist Lehm durch eine gute Wiederverwendbarkeit vollständig recyclingfähig.

Als Weiterentwicklung der jahrtausendealten, weltweiten Tradition des ortsgebundenen Stampflehmbaus wurden in den letzten Jahren sehr gute Erfahrungen mit vorgefertigten Lehmblöcken gewonnen. Hierzu wird erdfeuchter Lehm in einer Schalung in entsprechenden Formaten schichtweise verdichtet, ausgeschalt, zum Trocknen und der Weiterverarbeitung – Transport und Montage zwischengelagert.

Wird der Lehm zuvor mit Stroh vermengt, spricht man von Wellerlehm. Der Herstellungsprozess von Blöcken von Wellerlehm wurde bisher nicht systematisch untersucht. Dies erscheint aber im Rahmen des laufenden Projektes zusätzlich interessant, da durch auf diese Weise hergestellte Lehmelemente weitere, ggf. ergänzende Charakteristika aufweisen könnten. Es geht also hierbei um Vorfertigung. Diese Arbeit an der TH Lübeck verfolgt daher zunächst folgende Ziele als Vorbereitung für die konzeptionellen Entwicklung einer Maschine zur Herstellung von Blöcken aus Wellerlehm:

- Empirische Ermittlung der Prozessparameter für die Herstellung von Wellerlehmblöcke und deren Einfluss auf die Druckfestigkeit der Wellerlehmblöcke haben
- Entwickeln von Kinematikstudien als Grundlage für die Konzeptentwicklung der Wellerlehmpresse

3 EMPIRISCHE ERMITTLUNG DER PROZESSPARAMETER FÜR DIE HERSTELLUNG VON WELLERLEHMBLÖCKE

3.1 Versuchsziele

Für die Herstellung von Wellerlehmblöcken wird das Lehm-Stroh-Gemisch schichtweise verdichtet. So besteht der vergleichsweise kleine Lehmblock in Abbildung 1 aus 4 Schichten.

Für die Herstellung der Wellerlehmblöcke sind folgende Prozessparameter relevant:

- Erforderliche Druck für die Verdichtung Lehmlagen
- Feuchtegehalt des Lehm-Stroh-Gemischs
- Dicke der Lagen

Die Prozessparameter haben entscheidenden Einfluss auf die Druckfestigkeit der Wellerlehmblöcke. Durch empirische Versuche sollen optimale Werte für die 3 Parameter gefunden werden.



Abbildung 1: Lehmblock aus 4 Schichten

3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

3.2.1 Lehm

Im übergeordneten Rahmen des dbu-Forschungsprojektes wird die Verwendbarkeit von Aushubmaterial der zukünftigen Autobahnbaustelle (A14), bzw. auf jeden Fall ortsnahe Material zur Errichtung einer Lehmlärmschutzwand in der Region anvisiert.

Der verwendete Lehm entstammt in diesem Fall aus einer Kiesgrube nahe des Ortes Nebelin im Bundesland Brandenburg. Dieser wurde schon im Vorhinein mit Stroh vermisch. Der an der TH Lübeck durchgeführte Schlammversuch mit einer Probe des Nebeliner Lehms ergab nachfolgende Sieblinie, siehe **Error! Reference source not found**. Der Lehm enthält 13 % Ton, 47 % Schluff, 20 % Sand und 20 % Kies und kann aufgrund des Tonanteils als Magerlehm klassifiziert werden.

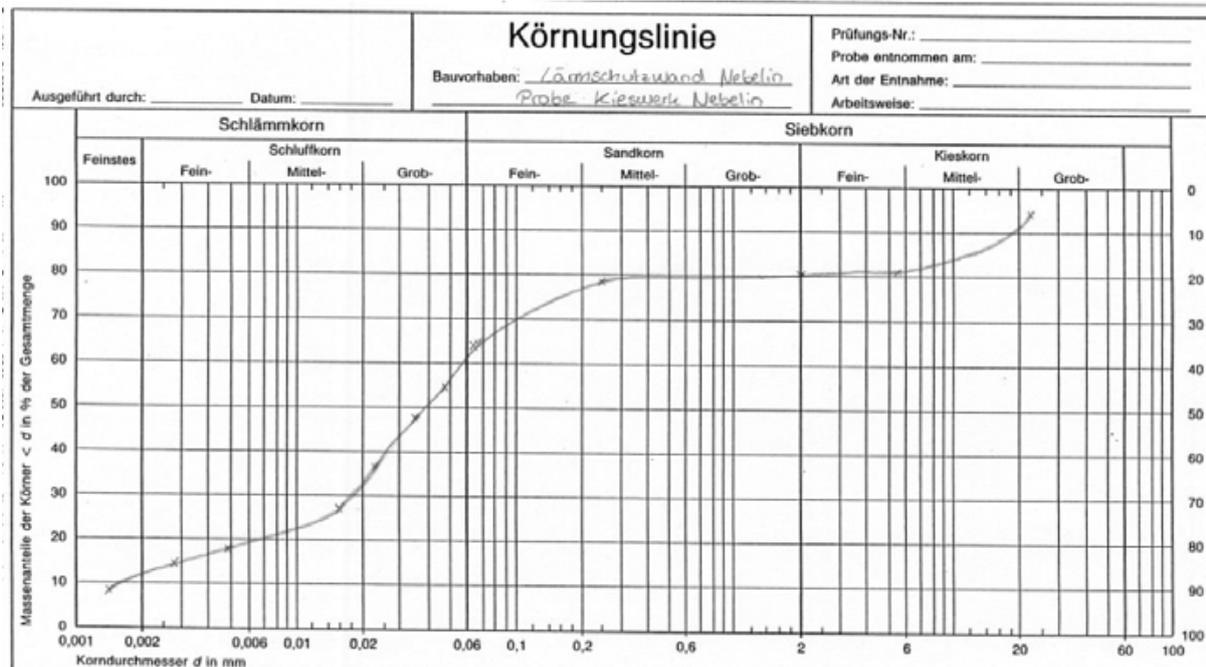


Abbildung 2: Sieblinie des Nebeliner-Lehms

3.2.2 Lehmblöcke und Schalung

Die Formate der Testkörper orientieren sich an denen, die üblicherweise im Betonbau verwendet werden. Sie haben somit eine Kantenlänge von 200mm x 200mm x 200mm. Für die Schalung wurden Holzformen aus 15 mm starken OSB-Platten verwendet, um Verformungen durch den im Lauf des nachfolgenden Tests ausgeübten Druck zu vermeiden. Sie wurden von der Metallwerkstatt der TH Lübeck gefertigt, siehe Abbildung 3.

Die Schalungen wurden mit Schrauben verbunden.



Abbildung 3: Lehmblöcke und Schalung

3.2.3 Presse

Für die Verdichtung der Lehmschichten wird eine Presse des Herstellers Zwick eingesetzt. Es handelt sich um eine computergesteuerte Werkstoffprüfmaschine für

Zug-, Druck- und Biegeprüfungen. Die Presse wird von der Materialprüfanstalt Schleswig-Holstein der TH Lübeck zu Verfügung gestellt, siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: Presse zur Verdichtung der Lehmblöcke

3.2.4 Trocknungsschränke

Für die Trocknung wurden Trocknungsschränke der Fa. MEMMERT eingesetzt, siehe Abbildung 5. Die erforderliche Trocknungstemperatur darf einen Wert von 100 °C nicht übersteigen.



Abbildung 5: Trocknungsschränke

3.2.5 Versuchsplanung

Die Werte der drei Prozessparameter Verdichtungsdruck, Feuchtegehalt und Lagendicke werden sinnvoll variiert, so dass sich 16 verschiedene Kombinationen ergeben, siehe Tabelle 1. Mit einer Stichprobe von 5 errechnen sich so 80 Versuche für die Ermittlung der Prozessparameter. Für jeden Versuch wird die Druckfestigkeit der Lehmblöcke und das Gewicht gemessen.

| | | | |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|--|
| Feuchtegehalt | Verdichtungsdruck N/mm ² | Lagenanzahl und -dicke | |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|--|

| | | | |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 10% | 0,1 | 2 Lagen je 100mm | 1 |
| | 0,2 | 2 Lagen je 100mm | 2 |
| | 0,3 | 2 Lagen je 100mm | 3 |
| 15% | 0,1 | 2 Lagen je 100mm | 4 |
| | | 2 Lagen je 100mm | 5 |
| | | | 3 Lagen je 66,6mm |
| | 0,2 | 5 Lagen je 40mm | 7 |
| | | 2 Lagen je 100mm | 8 |
| | | | 3 Lagen je 66,6mm |
| | 0,3 | 5 Lagen je 40mm | 10 |
| 2 Lagen je 100mm | | 11 | |
| 0,4 | 2 Lagen je 100mm | 12 | |
| 20% | 0,1 | 2 Lagen je 100mm | 13 |
| | 0,2 | 2 Lagen je 100mm | 14 |
| | | 3 Lagen je 66,6mm | 15 |
| 25% | 0,2 | 2 Lagen je 100mm | 16 |

Tabelle 1: Versuchsplanung

Für jeden Lehmblock sollen folgende Parameter aufgezeichnet werden:

Formgewicht trocken

- Gewicht für jede neue Lage
- Gewicht nach dem Verdichten aller Lagen
- Gewicht nach dem Trocknen
- Erforderlichen Druckkraft bis zur Zerstörung des Blocks (=Druckfestigkeit)

Aus den Messwerten lassen sich die Werte für die Dichte (unverdichtet, verdichtet und getrocknet) sowie die Druckfestigkeit errechnen.

3.2.6 Versuchsdurchführung

Vorbereitung

Die Vorbereitung des Lehms erfolgt einen Tag vor der Versuchsdurchführung. Nach dem Mischen von Stroh und Lehm wird das Gemisch mit dem zu untersuchenden Wassergehalt für 24h gemaukt¹. Zudem werden alle Holzformen beschriftet und gewogen. Das Wiegen der Holzformen dient zur Ermittlung des Nassgewichts der Proben, falls das Ausschalen der Lehmsteine nach der Verdichtung nicht möglich ist.

Verdichten

Zur Herstellung der Lehmblöcke wird der Lehm schichtweise in die Form gefüllt. Zu Beginn jeder Versuchsreihe wird eine Probe für die erforderliche Lagendicke gemacht, um die angegebene Größe mit möglichst gleichen Lagendicken zu erreichen. Abweichungen der Probekörper von bis zu 2 mm liegen innerhalb der Toleranz.

Die Maximale Verdichtungskraft beträgt in der Endlage der Presse 50kN. Bei einer Stempelgröße von 200mm x 200mm errechnet sich ein Druck von 1,25N/mm². Die Haltezeit in der Endlage beträgt 60s. Nachdem eine Lage verdichtet wurde, wird die Oberfläche der

¹ Mauken: ist ein Prozess, in dem durch längerandauerndes Lagern die Feuchte im Lehm homogen verteilt wird

verdichteten Lage mit einem Stab (etwa 2 mm Durchmesser) angeraut. Dies soll eine gute Kohäsion zwischen den einzelnen Lagen herstellen. Abbildung 6 zeigt verdichtete Lehmblöcke.



Abbildung 6: Verdichtete Lehmblöcke

Trocknen

Nach Beendigung der Verdichtung und Ausschalen der Proben werden diese in den Trocknungsschrank gebracht und bei einer Temperatur unter 100 °C getrocknet. Die Temperatur darf diesen Wert nicht übersteigen, da das absorbierte Wasser bei einer Temperatur von 105°C verdampft. Bei allen untersuchten Proben beträgt die Trocknungszeit ca. 3 Tage bei einer Temperatur von 95°C, auch wenn der Feuchtegehalt unterschiedlich ist.

Um festzustellen, ob die Proben trocken sind, werden diese an zwei Tagen nacheinander gewogen. Wenn es keine weitere Veränderung des Gewichts gibt, sind die Proben trocken. Es ist zu beachten, dass getrocknete Proben beim Wiegen oder Transport etwas Lehm verlieren (ca. 40g - 100g). Abbildung 7 zeigt einen getrockneten Lehmblock.



Abbildung 7: Getrockneter Lehmblock

Druckfestigkeitsprüfung

Nach dem Trocknen wird ein Druckfestigkeitstest durchgeführt. Dies erfolgt mit derselben Presse, siehe Abbildung 8. Hierzu wird mit einem Stempel mit der Größe der Oberfläche des Lehmblocks (20cm x 20 cm) eine Druckkraft auf den Lehmblock ausgeübt.

Wichtig hier: Die Pressrichtung muss mit der Verdichtungsrichtung übereinstimmen. Die Kraft wird bis zur Zerstörung des Lehmblocks erhöht. Mit der Oberfläche des Lehmblocks kann im Anschluss die Druckfestigkeit als erforderliche Druck bis zur Bersten des Lehmblocks errechnet werden.



Abbildung 8: Druckfestigkeitsprüfung

Beobachtungen während der Versuchsdurchführung

In Tabelle 2 sind die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung dokumentiert.

| Feuchte- gehalt | Verdichtungs- druck N/mm ² | Lagenanzahl | Allgemein | Aus- schalen | Zusammen- halt der Lagen | Kanten- und Ecken- festigkeit | Transportier- -barkeit | Stabilität gegen kleine Stöße | |
|--------------------|--|-------------|--|-----------------|--------------------------------|--|---------------------------|--|---------|
| 10% | 0,1 | 2 Lagen | Der Lehm ist erdfeucht und nicht klebrig. Das Stroh hat nicht genug feuchte und das ganze Gemisch ist hat zu wenig Wasser. | Schlecht | Schlecht | Schlecht | Schlecht | Schlecht | |
| | 0,2 | | | | | | | | |
| | 0,3 | | | | | | | | |
| 15% | 0,1 | 2 Lagen | Der Lehm hat einen Wassergehalt wie Stampflehm ungefähr. Der Lehm ist bisschen klebrig und das Stroh hat gute Feuchte | Schlecht | Schlecht | Schlecht | Schlecht | akzeptable | |
| | 0,2 | 2 Lagen | | | | | | | |
| | | 3 Lagen | | | | | | | |
| | | 5 Lagen | | | | | | | |
| | 0,3 | 2 Lagen | | | | | | | |
| | | 3 Lagen | | | | | | | |
| 5 Lagen | | | | | | | | | |
| 20% | 0,4 | 2 Lagen | Der Lehm ist klebrig und das Stroh hat sehr gute Feuchte. Der Lehm lässt sich gut plastisch verformen | ok | sehr gut | sehr gut | sehr gut | besser | |
| | 0,5 | 2 Lagen | | | | | | | |
| | 0,1 | 2 Lagen | | | | | | | |
| 25% | 0,2 | 2 Lagen | Der Lehm ist klebrig und das Stroh hat sehr gute Feuchte. Der Lehm lässt sich gut plastisch verformen. Das hohe Feuchtegehalt hat den Verdichtungsprozess beeinträchtigt, was die Druckfestigkeit negativ beeinflusst hat Längere Trocknungszeit | Schlecht | sehr gut | sehr gut | sehr gut | sehr gut | optimal |
| | | | | | | | | | |

Tabelle 2: Versuchsbeobachtungen

3.3 Ergebnisse

Die Tabelle zeigt die Versuchsergebnisse. Die rot markierte Felder haben eine Abweichung größer 10 % zu dem Mittelwert der Druckfestigkeit.

| Feuchte- gehalt | Verdichtungsdruck N/mm ² | Lagenanzahl ² | Proben | | | | | Mittelwert Druckfestigkeit N/mm ² | | Durchschnittliche Dichte in kg/m ³ | Bezeichnung |
|--------------------|--|--------------------------|--------|------|------|------|------|---|----------------------|--|-------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Alle Werte | Ohne „rote“ Werte | | |
| 10% | 0,1 | 2 Lagen | 0,09 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 1316 | E |
| | 0,2 | 2 Lagen | 0,36 | 0,46 | 0,44 | 0,52 | | 0,44 | 0,47 | 1378 | F |
| | 0,3 | 2 Lagen | 0,68 | 0,68 | | | | 0,68 | 0,68 | 1440 | X |
| 15% | 0,1 | 2 Lagen | 0,41 | 0,29 | 0,34 | 0,41 | 0,39 | 0,34 | 0,36 | 1385,00 | A |
| | 0,2 | 2 Lagen | 0,68 | 0,67 | 0,73 | 0,57 | 0,61 | 0,57 | 0,65 | 1472,50 | B |
| | | 3 Lagen | 0,85 | 0,69 | 0,88 | 0,89 | 0,83 | 0,83 | 0,81 | 1469,00 | H |
| | 0,3 | 5 Lagen | 0,93 | 1,28 | 0,92 | 1 | 0,78 | 0,92 | 0,92 | 1503 | G |
| | | 2 Lagen | 0,6 | 0,87 | 0,82 | 0,96 | 1 | 0,912 | 0,91 | 1557 | Y |
| 20% | 0,1 | 3 Lagen | 1 | 0,92 | 0,94 | 0,98 | 0,98 | 0,92 | 0,96 | 1578,75 | S |
| | 0,2 | 5 Lagen | 1,37 | 1,37 | 1,41 | 1,42 | 1,45 | 1,37 | 1,40 | 1593 | R |
| | | 2 Lagen | | 1 | 1,17 | 1,08 | 1,19 | 1,1 | 1,11 | 1577 | Z |
| 25% | 0,1 | 2 Lagen | 1,06 | 1,21 | 1,01 | 1,29 | 1,15 | 1,01 | 1,14 | 1650 | Q |
| | 0,2 | 2 Lagen | 0,97 | 1 | 1,19 | 0,9 | 1 | 0,90 | 1,01 | 1496,75 | C |
| | | 3 Lagen | 1,3 | 1,12 | 1,24 | 1,15 | 1,12 | 1,12 | 1,19 | 1569,50 | D |
| 0,2 | 3 Lagen | 1,31 | 0,9 | 1,04 | 1,11 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,11 | 1660 | I |
| | 2 Lagen | 0,94 | 0,9 | 0,9 | | | 0,9 | 0,91 | 1547 | P | |

Tabelle 3: Versuchsergebnisse

² Die Lagedicke in mm ist von dem zu entnehmen

3.4 Versuchserkenntnisse

3.4.1 Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Abbildung 9 zeigt, dass die Druckfestigkeit in dem Bereich von 15 % bis 20 % Feuchtegehalt der Mischung signifikant ansteigt. Bei 20% Wassergehalt ergibt sich ein Maximum. Ab diesem Maximum nimmt die Druckfestigkeit bei Erhöhung der Wassergehalt ab. Die grün hervorgehobenen Punkte sind interpoliert.

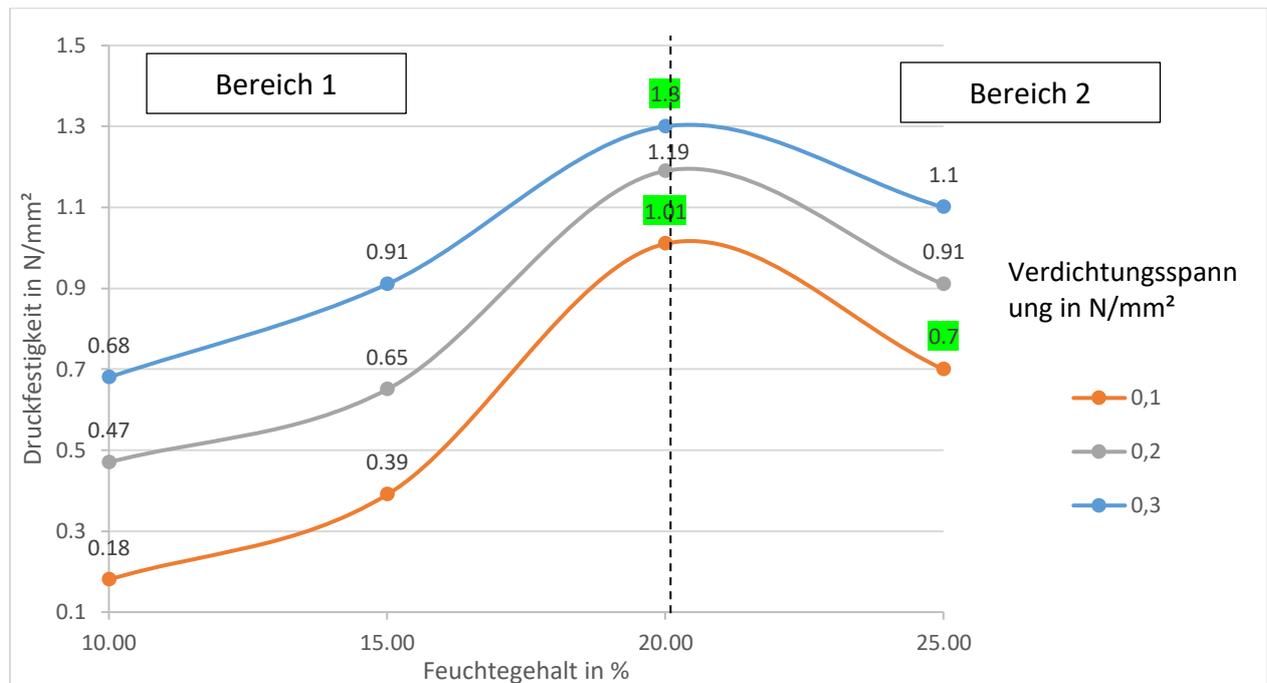


Abbildung 9: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts bei unterschiedlichen Verdichtungsdrücke und Lageanzahl von 2

Bereich 1: Feuchtegehalt von 10 % bis 20 %

Im ersten Bereich nimmt die Druckfestigkeit zu. Der Lehm wird bei höherem Feuchtegehalt plastischer. Das führt zu einer Verbesserung der Verdichtung, da die Porenräume mit Lehm anstelle von Luft gefüllt werden, und die Reibungskräfte zwischen den Körnern überwunden werden können.

Dies bestätigt die Messung der Dichte der Proben, siehe Tabelle 3. Beispielsweise beträgt im Versuch B mit 15% Feuchtegehalt die Dichte $1472,5 \text{ kg/m}^3$ während beim ähnlichen Versuch D mit 20% Feuchtegehalt die Dichte $1569,50 \text{ kg/m}^3$ beträgt. Verdichtungsdruck und Lagenanzahl sind bei beiden Versuch gleich.

Bei einem geringen Feuchtegehalt von 10%, hat der Lehm nicht genug Wasser, um die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körner zu überwinden, siehe Abbildung 10. Nach dem Abpressen der Probe ist zu erkennen, dass der Lehm eine schlechte Haftung aufweist, da der Lehm wieder krümelig wird. Wenn die Verdichtungsspannung erhöht wird, wird der Lehm besser verdichtet und zeigt somit eine bessere Druckfestigkeit. Diese ist aber sehr gering. Die Bindekraft ist sehr schlecht und die Kanten und Ecken sehr zerbrechlich.



Abbildung 10: 10 % Feuchtegehalt und $0,1 \text{ N/mm}^2$ Verdichtungsspannung, Trocken

Bei einem Feuchtegehalt 15 % ist der Lehm etwas plastischer. Die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern können besser überwunden werden. Aus der **Error! Reference source not found.** ist ersichtlich, dass die Lagendicke die Verdichtung beeinflusst. Es ist zu sehen, wie der Lehm an Position (1) gut verdichtet, aber an Position (2) eher schlecht. Dies geschieht, weil die Reibungskräfte nicht vollständig überwunden wurden und weil der Lehm nicht plastisch genug ist, um die Porenräume zu füllen. Die Blöcke zeigen einen besseren Zusammenhalt. Die Bindewirkung hat sich bei Erhöhung des Wassergehalts verbessert.

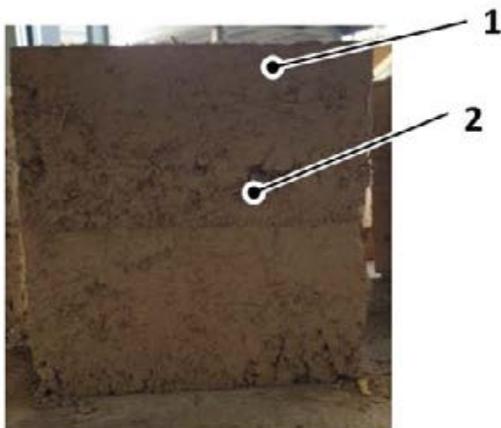


Abbildung 11: 15% Wassergehalt $0,2 \text{ N/mm}^2$ trocken

Wenn die Verdichtungsspannung erhöht und die Lagendicke variiert wird, steigt die Druckfestigkeit und die Blöcke sind bei fünf Lagen sehr fest und haben einen optimalen Zusammenhalt. Die Stabilität der Ecken und Kanten ist wesentlich besser als bei einem Wassergehalt von 10 %.

Bereich 2: Wassergehalt > 20 %

In dem zweiten Bereich lässt die Druckfestigkeit bei höheren Feuchtegehalt nach, weil die Porenräume auch Wasser enthalten. Durch die hohe Drucksteifigkeit des Wassers kann der Lehm nicht verdichtet werden.

Der Lehm ist stark plastisch. Nach der Trocknung sind die Proben bei einer Verdichtungsspannung von $0,2 \text{ N/mm}^2$ sehr fest und haben wesentlich stabilere Kanten und Ecken als die Proben mit niedrigen Wassergehalten, siehe Abbildung 12. Der Lehm ist genug plastisch, um die Hohlräume zu schließen und der Zusammenhalt ist ausgezeichnet Dies ist

unter anderem beim Abpressen zu beobachten, da hier die Blöcke eine Rissbildung aufweisen und nicht in Stücke zerfallen oder zerbröseln.

Fazit:

- Der Feuchtegehalt der Mischung hat einen hohen Einfluss auf die Druckfestigkeit
- Ein Feuchtegehalt von ca. 20% scheint für den Verdichtungsprozess optimal.
- Höhere Trocknungszeit ist bei größerem Feuchtegehalt notwendig



Abbildung 12: 20 % Wassergehalt, Verdichtungsspannung beträgt 0,2 N/mm², trocken

3.4.2 Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck

Abbildung 13 zeigt, dass die Druckfestigkeit mit zunehmender Verdichtungsspannung stark ansteigt.

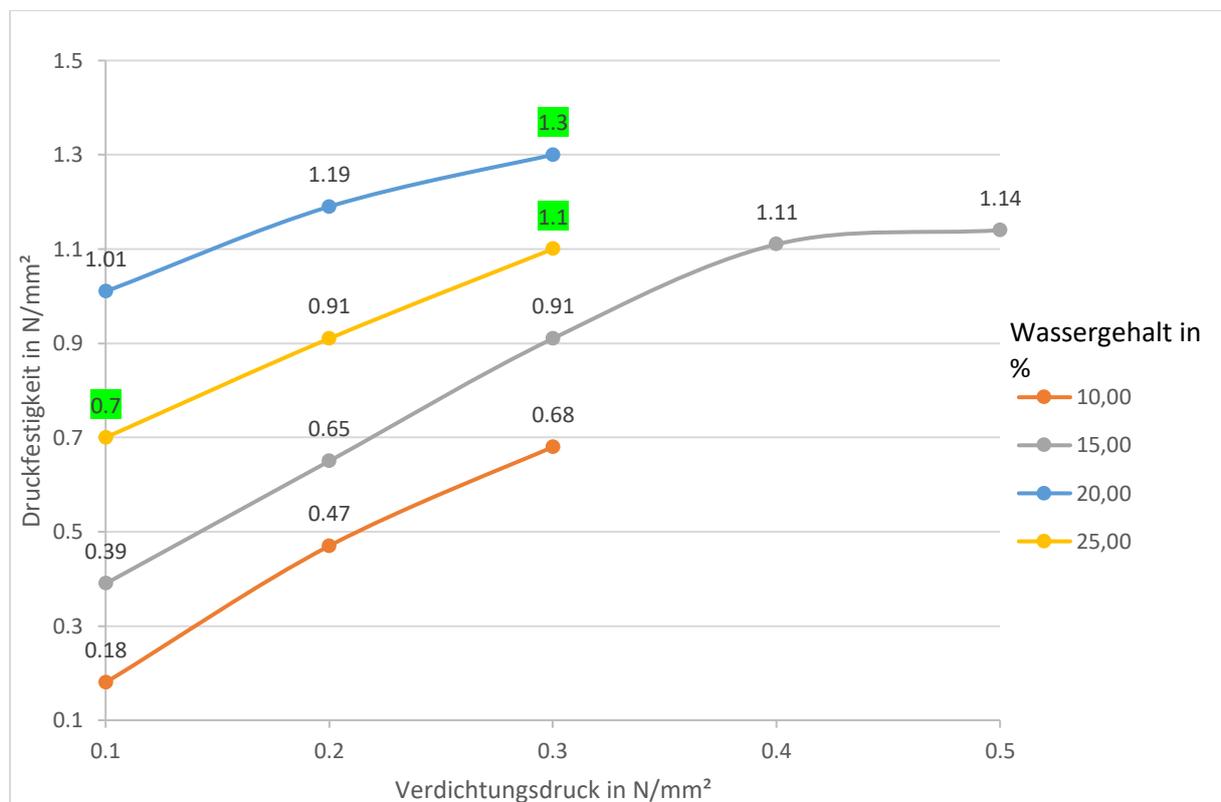


Abbildung 13: Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck bei unterschiedlichen Wassergehalten und 100mm Lagendicke (zwei Lagen)

Wenn der Verdichtungsdruck von 0,1 N/mm² auf 0,4N/mm² steigt, nimmt beispielsweise bei einem Feuchtegehalt von 15% die Druckfestigkeit den Faktor 2,8 zu. Ab 0,5N/mm²

Verdichtungsdruck wird die Kurve flacher, weil die Lagen wahrscheinlich komplett verdichtet sind. Ein höherer Verdichtungsdruck hat keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit.

Fazit:

- Bei Erhöhung des Verdichtungsdrucks werden die Lagen besser verdichtet, die Druckfestigkeit nimmt zu
- Je größer der Feuchtegehalt desto geringer ist der erforderliche Verdichtungsdruck
- Ein Verdichtungsdruck von 0,3-0,4n/mm² scheint optimal

3.4.3 Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Lagendicke

Die Dicke der Lehmlagen hat einen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit, siehe Abbildung 14. Ursache ist hohe Reibung zwischen den Lehmteilchen beim Verdichten. Bei höherer Lagendicke reduziert sich der Verdichtungsdruck in Lagenmitte stark.

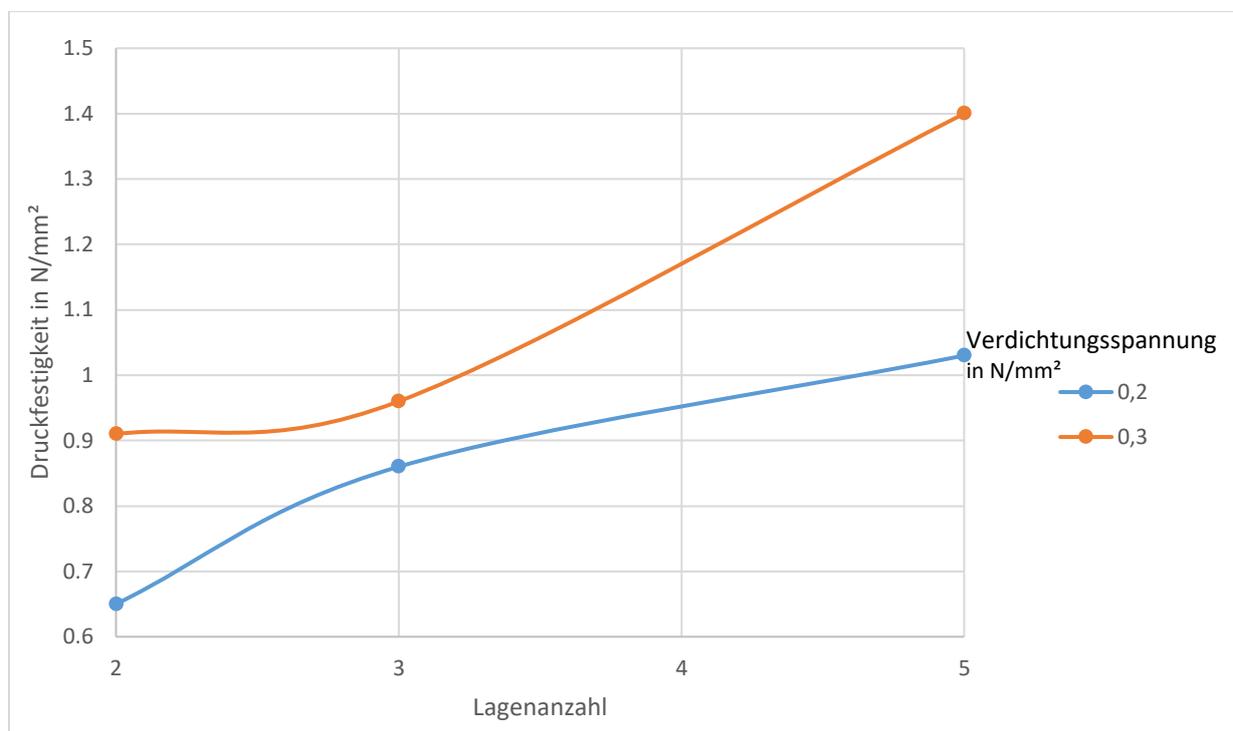


Abbildung 14: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Lagendicke bei unterschiedlichen Verdichtungsdrücken und bei 15% Feuchtegehalt

Wenn beispielsweise die Proben in zwei Lagen hergestellt und mit 0,2 N/mm² Verdichtungsdruck verdichtet werden, beträgt die Druckfestigkeit 0,67 N/mm²; wenn die Proben in fünf Lagen hergestellt und mit demselben Druck verdichtet werden, beträgt die Druckfestigkeit 1,03N/mm².

Fazit:

- Dünnere Lagen führen zu besserer Verdichtung des Lehms und zu höherer Druckfestigkeit
- Die verdichteten Lagen sollte eine Dicke sollte 20mm bis 66mm haben.
- Mehr Lehmlagen verlängern die Herstellungsprozess

3.4.4 Zusammenfassung

Feuchtegehalt

- Der Feuchtegehalt hat den größten Einfluss auf die Druckfestigkeit
- Ein Feuchtegehalt von ca. 20% ist für den Verdichtungsprozess optimal.
- Höhere Trocknungszeit bei größerem Feuchtegehalt

Verdichtungsdruck

- Bei Erhöhung des Verdichtungsdrucks werden die Lagen besser verdichtet, die Druckfestigkeit nimmt zu
- Je größer der Feuchtegehalt desto geringer ist der erforderliche Verdichtungsdruck
- Ein Verdichtungsdruck von 0,3-0,4n/mm² ist optimal

Lagendicke

- Dünnere Lagen führen zu besserer Verdichtung des Lehms und zu höherer Druckfestigkeit
- Die verdichteten Lagen sollte eine Dicke sollte 20mm bis 66mm haben.
- Mehr Lehmlagen verlängern die Herstellungsprozess

Für das weitere Vorgehen werden folgende Parameter empfohlen:

| Parameter | Minimum | Maximum |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|
| Wassergehalt | 15% | 18% |
| Verdichtungsspannung | 0,3 N/mm ² | - |
| Lagendicke vor der Verdichtung | - | 75 mm |
| Lagendicke nach der Verdichtung | 20mm | 60mm |

4 KINEMATIKSTUDIEN

4.1 Anforderungsliste für die Entwicklung

Die Anforderungsliste für die Konzeptentwicklung ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt.

| TH Lübeck | | Projekt: Wellerlehmpresse | | | | |
|-----------------|-----------|------------------------------|-------------------|---|----------------|--|
| | | Anforderungen | | | | |
| Änderungsdatum | Art (F/W) | Nr | Merkmal | Ausprägung | Verantwortlich | |
| 19.02.2021 1 | | 1 | Nutzung | | | |
| | F | 1.1 | Einsatz | Verdichtung von Lehmbaustoffe | Saleh | |
| | F | 1.2 | Einsatzort | in einer Halle oder an der Baustelle | Saleh | |
| | | 2 | Kräfte | | Saleh | |
| | F | 2.1 | Verdichtungsdruck | Mind. 0,3 N/mm ² | Saleh | |
| | F | 2.2 | Art der Kraft | Druckkraft | Saleh | |
| | F | 3 | Energie | | Saleh | |
| | F | 3.1 | Energieversorgung | 240/400 V Wechselstrom | Saleh | |
| | | | Signal | | Saleh | |
| | F | 4.1 | Anzeige | Druck, Kraft, Position und Verdichtungsgeschwindigkeit | Saleh | |
| | F | 4.2 | Licht | Arbeitszustand, also Materialzufluss, Verdichtung, Verdichtungsende | Saleh | |
| | | Februar 2021 | | Versionsnummer: 1 | | |

Tabelle 4: Anforderungsliste Teil 1

| TH Lübeck | | Projekt: Wellerlehmpresse | | | |
|------------|------------------|------------------------------|--|---|----------------|
| | | | Anforderungen | | |
| Datum | Art (F/ W) | Nr | Merkmal | Ausprägung | Verantwortlich |
| 19.02.2021 | | 5 | Sicherheit | | Saleh |
| | F | 5.1 | Notstop | | Saleh |
| | F | 5.2 | Notausschalter | An jede Stelle erreichbar | Saleh |
| | F | 5.3 | Maschinensicherheit | nach EN ISO 12100 | Saleh |
| | F | 6 | Ergonomie | Mensch-Maschine-Beziehung | Saleh |
| | F | 7 | Transport | Max. mit einem leichten LKw | Saleh |
| | F | 8 | Montage/Demontage | manuelle Montage | Saleh |
| | | 9 | Prozess | | Saleh |
| | F | 9.1 | Schichtdicke von Lehm nach der Verdichtung | 40 mm | Saleh |
| | W | 9.2 | Vorverdichtung | Lehm in der Schalung vorverdichten | Saleh |
| | F | 9.3 | Ausschalung | Einfaches Ausschalen der Blocks nach dem Verdichtungsprozess | Saleh |
| | F | 9.4 | Oberfläche der Verdichteten Schicht | Muss nach der Verdichtung der Schicht zu gekratzt werden (genügender Platz zum Kratzen) | |
| | Februar 2021 | | Versionsnummer: 1 | | |

Tabelle 5: Anforderungsliste Teil 2

4.2 Kinematikkonzepte

In Summe wurden 4 grundsätzlich unterschiedliche Kinematikkonzepte entwickelt. Sie unterscheiden sich in folgenden Merkmalen, siehe morphologisches Schema in Tabelle 6.

| Merkmal | Ausprägung 1 | Ausprägung 2 |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Richtung der Verdichtung | Horizontal | Vertikal |
| Größe des Verdichtungshubs | Höhe des Lehmblocks | Dicke der Lehmlagen |
| Gegenlage für Verdichtungsstempel | Ortsfest | Beweglich |

Tabelle 6: Morphologisches Schema zu Kinematikkonzepten

Darauf basiert ergibt sich durch Kombination der Merkmale nachfolgender Konstruktionskatalog, siehe Tabelle 7 und Tabelle 8. Bei allen 4 Konzepten wird die Kraft für die Verdichtung der Lehmlagen durch einen Hydraulikzylinder erzeugt.

4.2.1 Kinematikvariante 1

- Die Kinematikvariante ist dadurch gekennzeichnet, dass
 - *horizontal* verdichtet wird und
 - die Hublänge des Hydraulikzylinders für die Verdichtung der *Höhe des Lehmblocks* entspricht.
- Pro Lehmlage wird ein Verdichtungshub ausgeführt.
- Nach jedem Verdichtungshub wird die Einfüllöffnung horizontal um eine Lehmlage verschoben.
- Die Gegenlage ist ortsfest

4.2.2 Kinematikvariante 2

- Die Kinematikvariante ist dadurch gekennzeichnet, dass
 - *horizontal* verdichtet wird und
 - die Hublänge des Hydraulikzylinders für die Verdichtung der *Dicke einer Lehmlage* entspricht.
- Pro Lehmlage wird ein Verdichtungshub ausgeführt.
- Nach jedem Verdichtungshub wird die Gegenlage für den Verdichtungsstempel horizontal um eine Lehmlage verschoben.
- Die Einfüllöffnung ist ortsfest

4.2.3 Kinematikvariante 3

- Die Kinematikvariante ist dadurch gekennzeichnet, dass
 - *vertikal* verdichtet wird und
 - die Hublänge des Hydraulikzylinders für die Verdichtung der *Höhe des Lehmblocks* entspricht.
- Pro Lehmlage wird ein Verdichtungshub ausgeführt.
- Nach jedem Verdichtungshub wird der Verdichtungsstempel komplett eingezogen, um die Form für die nächste Lage zu befüllen
- Die Gegenlage ist ortsfest

4.2.4 Kinematikvariante 4

- Die Kinematikvariante ist dadurch gekennzeichnet, dass
 - *vertikal* verdichtet wird und
 - die Hublänge des Hydraulikzylinders für die Verdichtung der *Dicke einer Lehmlage* entspricht.
- Pro Lehmlage wird ein Verdichtungshub ausgeführt.
- Nach jedem Verdichtungshub wird
 - der Verdichtungsstempel komplett eingezogen, um die Form für die nächste Lage zu befüllen und
 - die Gegenlage um die Dicke einer Lehmlage abgesenkt

| Richtung der Verdichtung | Größe des Verdichtungs-hubs | Gegenlage für Verdichtungs-stempel | Nr. | Abbildung (Seitenansicht) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----|---|
| Horizontal | Höhe des Lehmblocks | Ortsfest | 1 | <p>1. Lage verdichtet</p> <p>2. Lage eingefüllt</p> <p>2. Lage verdichtet</p> |
| | Dicke der Lehmlagen | Beweglich | 2 | <p>1. Lage verdichtet</p> <p>1. Lage verschoben</p> <p>2. Lage eingefüllt</p> <p>2. Lage verdichtet</p> |
| Vertikal | Höhe des Lehmblocks | Ortsfest | 3 | <p>1. Lage verdichtet</p> <p>2. Lage eingefüllt</p> <p>2. Lage verdichtet</p> |

Tabelle 7: Konstruktionskatalog Kinematikkonzepte Teil 1

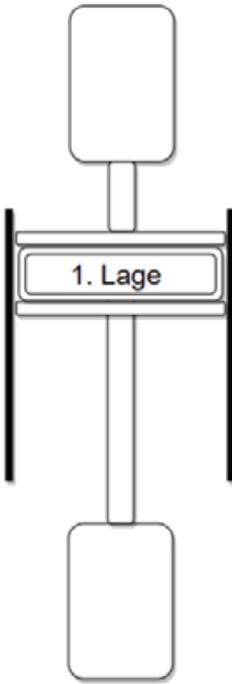
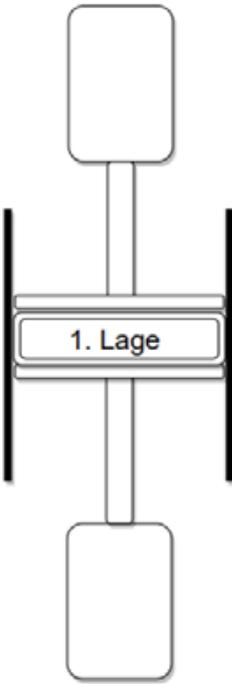
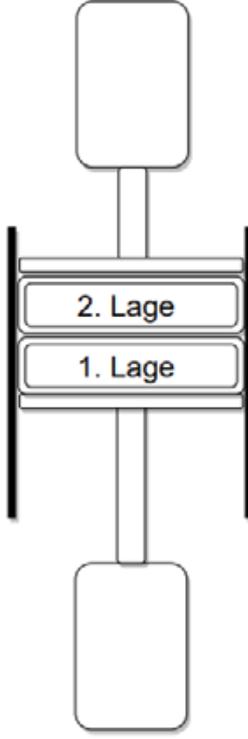
| Richtung der Verdichtung | Größe des Verdichtungs-hubs | Gegenlage für Verdichtungs-stempel | Nr. | Abbildung (Seitenansicht) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----|--|
| Vertikal | Dicke der Lehmlagen | Beweglich | 4 | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1. Lage verdichtet</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>1. Lage verschoben</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>2. Lage eingefüllt</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>2. Lage verdichtet</p>  </div> </div> |

Tabelle 8: Konstruktionskatalog Kinematikkonzepte Teil 2

4.3 Bewertung der Konzepte

Die Bewertungskonzepte werden nach den in dargestellten Kriterien bewertet, siehe Tabelle 9.

| Nr. | Kriterium | Gewichtungsfaktor |
|-----|---|-------------------|
| 1 | Aufwand und Qualität für die Befüllung | 33% |
| 2 | Produktionszeit für einen Block | 7% |
| 3 | Komplexität in Bezug auf die Bauteileanzahl | 20% |
| 4 | Aufwand für das Entschalen | 13% |
| 5 | Entnahme des Blocks aus der Form | 27% |

Tabelle 9: Bewertungskriterien und Gewichtungsfaktoren

Für die Bewertung wird eine Skala von 0 bis 4 verwendet, siehe Tabelle 10.

| Bewertungskriterien | | | Punkte | | | | |
|---------------------|---|------|--|---|--|----------------------------------|---|
| ID | Benennung | Gew. | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 1 | Aufwand und Qualität für die Befüllung | 33% | Seitlich, Schichtdicke durch Abrakeln, Gute Materialverteilung | direkt von oben, gleiche Positionen in schmalen Spalt, gute Materialverteilung. | direkt von oben, verschiedene Positionen in schmalen Spalt | | Seitlich, keine Kontroller der Verteilung |
| 2 | Produktionszeit für eine Block | 7% | 4,4 min | 4,5 min | 4,6 min | 5,1 min | |
| 4 | Komplexität in Bezug auf die Bauteileanzahl | 20% | 1 Zylinder, einfache Steuerung | 1 Zylinder. aufwändige Steuerung | | 2 Zylinder, aufwändige Steuerung | |
| 5 | Aufwand für das Entschalen | 13% | Nur Schalung bewegen | | | Gehäuse + Block bewegen | |
| 6 | Entnahme des Blocks aus der Form | 27% | ohne | | | Wenden erf. | |

Tabelle 10: Bewertungsskala

Die Bewertung der Kinematikvarianten ist in Tabelle 11 dargestellt. Die gewichtete Punktzahl P_G einer Kinematikvariante errechnet sich nach untenstehender Formel aus dem Gewichtungsfaktor G_i des Kriteriums i und der Punktzahl P_i :

$$P_G = \sum_{i=1}^5 G_i \cdot P_i$$

Die Kinematikvariante 3 und 4 haben eine ähnlich hohe gewichtete Punktzahl (3,39 und 3,4). Aus diesem Grund werden im weiteren Vorgehen die Kosten der Lösungen detaillierter analysiert. Nach Auswahl einer Kinematikvariante werden in nächsten Schritten grobmaßstäbliche Entwürfe entwickelt.

| Bewertungskriterien | | Kinematikvariante 1 (horizontal) | | Kinematikvariante 2 (horizontal) | | Kinematik- variante 3 (vertikal) | | Kinematik- variante 4 (vertikal) | |
|---|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|
| Nr. | Benennung | G _i | Ausprägung | Punktzahl P _i | Ausprägung | Punktzahl P _i | Ausprägung | Punktzahl P _i | Punktzahl P _i |
| 1 | Aufwand und Qualität für die Befüllung | 33% | direkt von oben, verschiedene Positionen in schmalen Spalt | 2 | direkt von oben, gleiche Positionen in schmalen Spalt | 3 | Seitlich, keine Kontroller der Verteilung | 4 | Seitlich, Schichtdicke durch Abrakeln |
| 2 | Produktionszeit für eine Block | 7% | 4,6 min | 2 | 4,4 | 4 | 5,1 min | 1 | 4,4 |
| 3 | Komplexität in Bezug auf die Bauteileanzahl | 20% | 1 Zylinder, aufwändige Steuerung | 3 | 2 Zylinder, aufwändige Steuerung | 2 | 1 Zylinder; einfache Steuerung | 2 | 2 Zylinder. aufwändige Steuerung |
| 4 | Aufwand für das Entschalen | 13% | Nur Schalung bewegen | 4 | Nur Schalung bewegen | 4 | Nur Schalung bewegen | 4 | Nur Schalung bewegen |
| 5 | Entnahme des Blocks aus der Form | 27% | Wenden erf. | 1 | Wenden erf. | 1 | ohne | 4 | ohne |
| Gewichtete Punktzahl P_G | | | | 2,19 | | 2,46 | | 3,39 | 3,4 |

Tabelle 11: Bewertung der Kinematikvarianten: je höher die Punktzahl, desto adäquater die Lösung

Fazit:

Aus den Untersuchungen, den Berechnungen und Analysen lassen sich erste Aussagen ablesen. Diese sind natürlich abhängig von der prozentualen Verteilung der Bewertungskriterien, die im vorliegenden Beispiel sich auf Erfahrungswerte aus dem Maschinenbau, den Diskussionen und Gesprächen mit Experten aus dem Bereich des Lehmbaus beziehen. Diese sollten jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht zu einem definitiven Urteil verleiten sollten, lediglich eine erste Orientierung bieten.

Weitere Schritte: neben notwendigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen müssten im Realversuch auch speziell die Qualitäten der durch die unterschiedlichen Pressvorgänge erzeugten Blöcke untersucht werden. Hier gilt es folgende 2 Fälle genau zu prüfen:

A Druckfestigkeitsprüfung der Blöcke, in Richtung der Pressrichtung der Herstellung

B Druckfestigkeitsprüfung **senkrecht** zur Pressrichtung der Herstellung

In historischen sowie aktuellen Beispielen werden Lehmelemente fast ausnahmslos gemäß Fall A eingebaut. Hier verläuft die zukünftige Drucklast eines Bauwerks (i.d.R. senkrecht) genau in Richtung, bzw. parallel zur Press- bzw. Verdichtungsrichtung der jeweiligen Lehmelemente. Als Beispiele sind zu nennen die ursprüngliche Herstellung von Lehmhandstrichsteinen, gepressten Lehmsteinen, die Wellertechnik, historischer und neuer Stampflehmbau. In der Regel ist ein kleinteiliges, schichtweises Pressen dabei positiv zu bewerten, es führt zu einer höheren Druckfestigkeit.

Es kann jedoch durchaus interessant sein, Tests zum Verfahren nach Fall B durchzuführen. Dabei ist zu beachten, dass durch den um 90° gedrehten Druckvorgang ein inhomogener Festigkeitshorizont den zukünftigen Druckkräften gegenübersteht. Dies könnte jedoch eventuell überwunden oder gar vernachlässigt werden, wenn sich herausstellen sollte, dass durch entsprechend hohe Pressung in der Herstellung diese Tatsache überwunden werden kann. Aufgrund der ersten Testreihen kommt bereits die Vermutung auf, dass im Gegensatz zu Verfahren nach A hier eher eine Pressung in einem Gang erfolgen sollte, um die Druckfestigkeit der Gesamtfläche nicht durch verminderte Bindung einzelner Schichten kompromittiert wird.

Prof. Heiner Lippe, arch. DPLG, DPLG terre

Die Autor:innen und weitere Beteiligte

Wo im Dokument kein Autor explizit angegeben ist, stammt das Material vom Team, das die Machbarkeitsstudie verfasst hat.

Autor:innen der Studie (alphabetisch)

Annika Gathof

Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung
Zuständigkeit: Lebensraum für Insekten und Vögel

Dr. rer. nat. Dieter Günnewig,
Bosch & Partner GmbH, Herne, Hannover, München, Berlin
Zuständigkeit: Bewertung als Naturschutzmaßnahme

Christian Hansel,
Lehmbau Lovis UG, Großpösna
Zuständigkeit: Lehmbau Wellerlehm, Verfahrenstechnik

Prof. Arch. DPLG CEAA Heiner Lippe,
Technische Hochschule Lübeck
Zuständigkeit: Akustik, Material- und Lebenszyklusberechnungen

Dr.-Ing. Jan Mittelstädt,
Knippers Helbig Advanced Engineering GmbH, Stuttgart, New York, Berlin
Zuständigkeit: Tragwerksplanung

Mag. Martin Rauch,
Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Schlins, Österreich
Zuständigkeit: Lehmbau Stampflehm, Verfahrenstechnik

Ute Reeh,
Künstlerin, Zentrum für Peripherie e.V., Düsseldorf, Nebelin
Zuständigkeit: Idee, Form und Prozess, Koordination, Öffentlichkeitsarbeit

Externe Autor:innen (alphabetisch)

Inken Bork
Studentin Bauingenieurwesen an der TH Lübeck

Dipl.-Ing. Michael Chudalla
Bundesanstalt für Straßenwesen, Immission

Heike Ellner
Leiterin des Biosphärenreservats Flusslandschaft Elbe-Brandenburg

Petra Kind,
Baukulturinitiative Brandenburg bei der Bundesstiftung Baukultur

Dr. Birgit Kocher
Bundesanstalt für Straßenwesen, Geoökologie

Peter Köddermann
Geschäftsführer Baukultur Nordrhein-Westfalen

Mitarbeiter:innen an Teilbereichen des Projekts und Berater:innen (alphabetisch)

Björn Bechtel, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Schlins, Österreich;
Assistent von Martin Rauch

Burghardt Behrend, Bewohner von Nebelin;
Mitarbeit beim Bau der Probewand, Mitarbeit Pilotversuch Wellerlehmpresse

Matthias Behrendt, Maurer, Ortsvorsteher des Dorfes Nebelin, Brandenburg;
Interessenvertretung der Bewohner von Nebelin, Mitarbeit beim Bau der Probewand

Daniel Beltrán, Videofilmer, Wittenberge, Brandenburg
Video-Dokumentation

Sebastian Bertalan, Zentrum für Peripherie e.V., Düsseldorf;
Dokumentation, CAD, DTP, Text

Inken Bork, Bauingenieurin, TH Lübeck;
Mitarbeit beim Bau der Probewand und bei den Akustik-Tests

Daniela Espitia, Wittenberge, Brandenburg
Videodokumentation

Maik Grünberger, Dachdecker, Plattenburg, Brandenburg
Abdeckung der Probewand, Beratung

Dipl.-Ing. Arch. BDA Martin Haas, haas cook zemmrich STUDIO2050
Architektur Raststättengebäude „Brandenburgs Alhambra“

Kay Hoffmann, Schlosser, Laaslich, Brandenburg
Maschinenbau Prototyp Wellerlehmpresse, Abdeckungselemente für die Probewand

Ulrich Petraschek, Maurer, Neblin
Bau des Fundaments der Probewand

Prof. Dr.-Ing. Nils Kohlase, FB Maschinenbau, Entwicklung und Konstruktion, TH Lübeck
Vortests Entwicklung Prototyp Wellerlehmpresse

Henry Krüger, Lehmbauer, Perleberg, Brandenburg
Mitarbeit in allen Bauetappen des Wellerlehmteils der Probewand, Wellerlehmpresse, Beratung

Elmar Losch, Lehmbauer, Lehm Ton Erde GmbH, Schlins, Österreich
Mitarbeit beim Bau des Stampflehmabschnitts der Probewand

Mohamad Saleh, Student Maschinenbau, TH Lübeck
Vortests Entwicklung Prototyp Wellerlehmpresse

Steffen Schmelzer, PS Kieswerke Perleberg
Beratung, Infrastruktur

Michael Schmiel
Konstruktion Prototyp Wellerlehmpresse

Thomas Stulier, Lehmbauer, Wirtschaftsingenieur;
Mitarbeit Pilotversuch Wellerlehmpresse

Petra Unterberg, Perleberg, Brandenburg
Zuständigkeit: Catering

Urs Seel, Student Bauingenieurswesen an der TH Lübeck
Mitarbeit beim Bau der Probewand und bei den Akustikmessungen

Bereitstellung von Material und Infrastruktur (alphabetisch)

Braas Dachziegelwerk Karstädt

Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Lehmbau Lovis UG

PS Kieswerke GmbH Perleberg

Ulrich Petraschek, Nebelin