

Gesteuerte Erosion

Strategien des Umgangs mit Verwitterung bei Stampflehm-Mauerwerk

Philipp Hoppe

Gesteuerte Erosion

Strategien des Umgangs mit Verwitterung bei Stampflehm-Mauerwerk

Von der Fakultät für Architektur
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Philipp Hoppe

Berichter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Hartwig Schneider
Univ.-Prof. Dr.-Ing. (Japan) Manfred Speidel

Tag der mündlichen Prüfung:
11. März 2022

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek
online verfügbar.

Für das Vertrauen, die Unterstützung, für die vielen bereichernden Gespräche und die inspirierende Zusammenarbeit gilt mein Dank:

Professor Hartwig Schneider

Professor Manfred Speidel

Martin Rauch

meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl Baukonstruktion und an der Fakultät für Architektur, vor allem Christian Schätzke, Carsten Eiden, Axel Timpe

den zahlreichen beteiligten Studierenden: Arghavan Afshar, Aiham Alshehabi, Katrin Amchislavski, Isabell Battenfeld, Svetlana Bell, Alexandra Berthold, Maximilian Bienefeld, Maximilian Bierholz, Anton Böhm, Maude Bovey (EPFL Lausanne), Ana Bozhinova, Han-Sol Cho, Stepan Cibulka (CTU Prag), Marc Donven, Viktoria Falk, Hanna Feldhagen, Silvia Fernández, Elsa Gaugué (EPFL Lausanne), Thomas Haber, Thiemo Hefner, Felix Heusch, Felix Hübbes, Chen Jiang, Anja Kauffels, Tobias Kleinschmidt, Daniel Körner, Christian Kühnle, Sunggyun Lee, Julia Leucht, Katja Lierhaus (Harvard University), Lukas Mahlendorf, Julian Martel, Isabella Medinaceli, Leonardo Meshedijan, Laurent Neu, Carmen Neuhaus, Thomas Papaj, Stephan Paschen, Leonardo Peressa (IUAV Venedig), Per Pink, Maria Poslihalina, Lies Quatanne (Universität Gent), Du Quingxian, Hannah Reckenthäler, Noémie Resbeut (EPFL Lausanne), Lukasz Rubnikowicz, Lukas Schlüter, Leah Stockburger, Fabian Stolz, Simon Tschepe, Ilse Verhaeghe (Universität Gent), Julie Vormweg, Daniel Wilken, Johanna Willert, Leonie Woltermann, Niklas Wolters, Jin Zhaoyun

Jochen Dahlhausen (ManuLab), Benedikt Baum (FormLab) und Michael Staack (Metall-Atelier).

Besonders herzlich danken möchte ich meinen Eltern, meiner Schwester, und Olya.

Kurzfassung

Angesichts des Klimawandels und des stetig steigenden Abfallaufkommens muss besonders im Bausektor dringend ein Umdenken hinsichtlich des Verbrauchs von Ressourcen stattfinden. Das Bauen mit Lehm, vor allem der Stampflehmbau, könnten hier eine Alternative aufzeigen und als Beispiel für ein zukunftsfähiges, zirkuläres Bauen dienen. Stampflehm weist eine hervorragende Ökobilanz auf, da oftmals vorhandener Erdaushub genutzt werden kann, insgesamt wenig Herstellungenergie anfällt, und der Baustoff in der Regel zu 100% wiederverwendbar ist. Zudem ermöglicht Stampflehm ein besonders „einfaches“ Bauen, da das Material zugleich Tragschicht und Außenhaut bilden kann. Auf eine Stabilisierung des wasserlöslichen Baustoffs mittels Kalk oder Zement, als auch Beschichtungen wie Putz, kann grundsätzlich verzichtet werden, da Stampflehm ausreichend widerstandsfähig gegen Schlagregen ist. Durch eine „Kalkulierte Erosion“ – das Zulassen eines für die Dauerhaftigkeit des Bauteils unschädlichen Maßes der Verwitterung – gewinnt eine Stampflehmfassade mit der Zeit an Ausstrahlung und steht damit im Kontrast zu vielen modernen Gebäudehüllen, deren oft fragwürdige Alterung zu relativ kurzen Lebensdauern führt.

Um den Stampflehmbau weiter zu verbreiten, könnte zudem die Weiterentwicklung der Bautechnik eine wichtige Rolle spielen. Besonders in der Mauerwerksbauweise, welche bislang kaum erforscht ist, wird großes Anwendungspotential gesehen. Zudem erscheint hier, aufgrund mit der Elementierung einhergehender, neuer Möglichkeiten der Herstellung, aber auch spezieller Erfordernisse der Bauweise, die Umsetzung kalkulierter Erosion besonders geeignet.

In der Arbeit wird daher der Frage nachgegangen, auf welche Weisen diese Umsetzung erfolgen kann. Hierzu werden unterschiedliche Strategien und Mittel des Eingreifens in den Erosionsprozess untersucht. Durch die Entwicklung einer typologischen Ordnung sowie exemplarische Anwendungsstudien wird schließlich ein Überblick über verschiedene funktionale und gestalterische Potentiale geschaffen. Kernergebnis der Arbeit ist das Konzept der *Steuerung der Erosion*. Dieses beschreibt die Intervention in den Erosionsprozess als Möglichkeit der Anpassung des Grades des Erosionsschutzes an die örtlichen Erfordernisse, als auch der Nutzung der besonderen Gestaltwirksamkeit der Erosion.

Abstract

In the face of climate change and increasing waste accumulation, the building sector in particular has to rethink its consumption of resources. Building with raw earth – especially rammed earth – could show an alternative path, and serve as an example for sustainable, circular building. Rammed earth features an excellent environmental performance evaluation, since excavation material can often be used as a basis, and relatively little energy is needed in the production process. Furthermore, the material is usually fully recyclable. Rammed earth also enables particularly „simple“ construction, since it can form both a bearing layer and outer skin. Stabilization of the water-soluble building material by means of lime or cement, as well as coatings such as plaster, can generally be dispensed with, since rammed earth is sufficiently resistant to driving rain. Through „Calculated Erosion“ – the acceptance of a degree of weathering that is harmless to the durability of the wall – a rammed earth façade is only gaining charisma over time. Thus, it contrasts with many modern building envelopes, whose often questionable aging leads to relatively short lifespans.

In order to make rammed earth construction more widespread, further development of construction technology could as well play an important role. Particularly in rammed earth masonry construction, which has hardly been researched so far, great application potential is seen. In addition, the implementation of calculated erosion appears to be particularly suitable here, due to the new possibilities of production associated with elementization, but also special requirements of the construction method.

This work hence addresses the question of how that implementation can be carried out. For this purpose, different strategies and means of intervening in the erosion process are investigated. Through the development of a typological order as well as exemplary application studies, finally an overview of different functional and design potentials is created. The core result of the work is the concept of *Steered Erosion*. It describes the intervention in the erosion process as a possibility of adapting the degree of erosion protection to local requirements, as well as the use of the special design-related effectiveness of erosion.

Inhalt

1	Einleitung	12
1.1	Thema	13
1.2	Ausgangsfragestellung	24
1.3	Aufbau und Methoden	25
2	Stand der Forschung und Technik	28
2.1	Stand der Forschung	29
2.2	Stand der Technik	31
3	Grundlagen	34
3.1	Stampflehm- bau	35
3.1.1	Geschichtliche Einführung	35
3.1.2	Baustoff und Bautechnik	38
3.2	Stampflehm-Mauerwerk	45
3.2.1	Vorläufer	45
3.2.2	Planungsgrundlagen	48
3.2.2.1	Konstruktive Grundlagen	49
3.2.2.2	Technische Rahmenbedingungen	53
3.3	Stampflehm und Erosion	56
3.3.1	Einflussfaktor Schlagregen	57
3.3.2	Arten des Erosionsschutzes	62
3.3.3	Frei bewitterte Anwendung	64
3.3.3.1	Erkenntnisse aus der Forschung	65
3.3.3.2	Anhaltspunkte für die Anwendung	68
3.3.4	Kalkulierte Erosion	72
3.3.4.1	Kalkulierte Erosion nach Rauch	72
3.3.4.2	Vorläufer und Referenzen	76
3.3.4.3	Erweiterte Def. kalkulierter Erosion	88
4	Explorative Untersuchungen: Strategien der Umsetzung kalkulierter Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk	90
4.1	Entwurfliche und praktische Studien	92
4.2	Mittel der Bremsung des Wassers	98
4.2.1	Durchführung der Untersuchungen	99
4.2.2	Ergebnisse	107
4.2.3	Schlussfolgerungen	118

4.3	Prinzipien der Manipulation des Wasserablaufs	120			
4.3.1	Durchführung der Untersuchungen	121			
4.3.2	Ergebnisse	123			
4.4	Exkurse	128			
4.5	Zusammenfassung und Ausblick	130			
5	Konfirmatorische Untersuchungen: Erosionsleisten	132			
5.1	Anforderungen	136			
5.1.1	Erosionsschutz	136			
5.1.1.1	Schutz der Oberfläche	137			
5.1.1.2	Schutz der Fugen und Steinkanten	138			
5.1.2	Beitrag zur Gestaltqualität	139			
5.1.2.1	Direkte Gestaltprägung	139			
5.1.2.2	Indirekte Gestaltprägung	141			
5.1.3	Ökologischer Leitsatz	144			
5.2	Typologie	145			
5.2.1	Ordnungskriterien und -merkmale	145			
5.2.1.1	Wirkungsweise	145			
5.2.1.2	Herstellungsweise	154			
5.2.2	Typenbildung	160			
5.3	Anwendungsstudien	164			
5.3.1	Betrachtungsrahmen	165			
5.3.2	Herstellungstechnische Annahmen	167			
5.3.2.1	Mörtelleiste	168			
5.3.2.2	Vorgefertigte Leiste	169			
5.3.2.3	Hybridformen	173			
5.3.2.4	Besonderheiten bei einzelnen Typen	174			
5.3.2.5	Vertikale Leisten	179			
5.3.2.6	Steinkanten	179			
5.3.2.7	Reparatur und Ersatz	180			
5.3.3	Annahmen der Erosionsprognose	181			
5.3.4	Darstellungsregeln	185			
5.3.5	Katalog	186			
5.3.5.1	Hg-Vf	188			
5.3.5.2	Hg-Vf_25	194			
5.3.5.3	Hu-Vf	200			
5.3.5.4	Lf-Vf	206			
5.3.5.5	Lr-Vf	212			
5.3.5.6	Ls-Vf/M	218			
5.3.5.7	Bg-M	224			
5.3.5.8	Bg-M_12,5	230			
5.3.5.9	Bg-Vf	236			
5.3.5.10	Bg-Vv	242			
5.3.5.11	Bu-M	248			
5.3.5.12	Bu-Vf	254			
5.3.5.13	Hg/Bg-Vf	260			
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	266			
5.4.1	Schutz der Oberfläche	266			
5.4.2	Schutz der Fugen und Steinkanten	267			
5.4.3	Direkte Gestaltprägung	268			
5.4.4	Indirekte Gestaltprägung	270			
5.4.5	Gesamtbeurteilung	271			
5.4.5.1	Steuerung der Erosion	275			
6	Resümee	282			
6.1	Fazit und Diskussion	283			
6.2	Ausblick	291			
A	Literaturverzeichnis	296			
B	Abbildungsnachweis	308			

1 Einleitung



Abb. 1-1: Baustoffindustrie und Emissionen

1.1 Thema

Angesichts der Endlichkeit der fossilen Ressourcen sowie der Herausforderungen, vor die uns Klimawandel und Umweltverschmutzung stellen, müssen in den Industrieländern dringend Wege in Richtung nachhaltigerer, ökologischer Lebensweisen gefunden werden. Dem Bausektor kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Die Produktion von Baustoffen wie Ziegel, Beton oder Stahl benötigt immense Mengen an Energie, womit entsprechende Emissionen klimarelevanter Gase einhergehen. Allein die Zementproduktion ist für etwa 8% des gesamten weltweiten CO₂-Ausstoßes verantwortlich.¹ Zudem steht, neben dem Betrieb von Gebäuden, auch deren Rückbau in der Verantwortung. Im Jahr 2017 etwa machten Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland rund 55% des gesamten Abfallaufkommens aus.²

Im Sinne des Ziels einer Kreislaufwirtschaft sind daher Bauweisen gefragt, welche möglichst sparsam mit Ressourcen umgehen, dauerhaft und schließlich in hohem Maße rezyklierfähig sind. Der Bund Deutscher Architekten hat jüngst in einem Positionspapier die Bedeutung dieser Ziele hervorgehoben. Unter zehn Postulaten führt er an:

¹ Dies entspricht etwa dem Vierfachen der Emissionen der Bundesrepublik Deutschland, vgl. z. B. Internationale Energieagentur IEA o. D.

² vgl. z. B. Statistisches Bundesamt 2019

„V. Bauen als materielle Ressource: Alle zum Bauen benötigten Materialien müssen vollständig wiederverwendbar oder kompostierbar sein. [...] Es gehört zum architektonischen Entwurf, Rezyklate im Neu- und Umbau mit einem gestalterischen Anspruch einzusetzen und zu erreichen, dass ganze Bauteile später selbst wieder zur Ressource werden. Verbunden ist damit ein ökologischer Anspruch an die Materialien und deren Verwendung.

VI. Vollständige Entkarbonisierung: Eine Entkarbonisierung erfordert einen Paradigmenwechsel im Material- und Energieeinsatz. Der Verzicht auf Materialien, die in ihrer Herstellung viel CO₂ emittieren, tritt als wichtiges ökologisches Kriterium an die Stelle der Energieeffizienz.“³

Neben dem Holzbau, welchem in den letzten Jahrzehnten bereits zunehmende Aufmerksamkeit zuteil wurde, bietet hier das Bauen mit Lehm Lösungen an. Reine Lehmbaustoffe haben einen bis zu 10-fach geringeren Primärenergieinhalt als gebrannte Ziegel oder Beton⁴, und schlagen in diesem Punkt sogar Holz bei weitem. Lehm ist fast überall auf der Welt in nahezu unbegrenztem Maße verfügbar, und grundsätzlich zu 100% wiederverwertbar. Er stellt so-

3 Bund Deutscher Architekten BDA 2019, S. 4

4 vgl. z. B. Ökobaudat o. D.



Abb. 1-2: Neubau eines Wohnhauses in Marokko, 2016: Lehm-Ruine und Betonstein-Architektur

mit einen besonders nachhaltigen, ressourcenschonenden Baustoff dar.

Lehmbau wird meist zunächst mit vernakulärer Architektur ferner Länder assoziiert. Jedoch ist er auch in unseren Breiten seit Jahrhunderten beheimatet. Ab dem 19. Jh. zunehmend von industriellen Baustoffen verdrängt, wurde er im Zuge der Umweltbewegung der 1970er Jahre zaghaft wiederbelebt, und erlebt aktuell eine neue Blüte in Europa. Wenngleich noch immer eine Nischenbauweise darstellend, beschränkt er sich heute nicht länger auf typische Bauaufgaben und Formensprachen der sogenannten „Öko-Architektur“. Fissabre und Wilson beobachten: „Gerade wie die Nachhaltigkeit im Allgemeinen, hat der Lehmbau im Besonderen ein ästhetisches Flair erhalten [...]“⁵

Seit einigen Jahren entstehen so immer mehr und immer größere Projekte in Lehmbauweise, welche sich einer zeitgenössischen Architektursprache und moderner Produktionsmethoden bedienen. Hierdurch erlangt der Lehmbau zwar zunehmend Aufmerksamkeit, hat jedoch auf der anderen Seite noch mit Vorbehalten, gering verbreitetem Fachwissen und genehmigungstechnischen Hürden zu kämpfen. Auch fehlt ihm eine Lobby, da er wirtschaftlich gesehen nur eine untergeordnete Rolle spielt.⁶

Während das Bauen mit Lehm in Europa, den USA oder Australien wieder geschätzt wird und aufgrund des noch hohen händischen Arbeitsaufwandes relativ kostenintensiv ist, stellt sich die Situation in vielen Ländern des globalen Südens paradoxerweise umgekehrt dar. Der Baustoff, bis vor nicht allzu langer Zeit selbstverständlich und allgegenwärtig, gilt heute als rückständig, verschwindet allmählich, und bereitet vermeintlich moderneren, aber auch ökologisch bedenklicheren und vor Ort teuren Materialien wie Ziegel oder Beton den Weg (Abb. 1-2). Über eine zeitgemäße heimische Kultivierung des Lehmbaus könnten die Industrieländer somit auch eine Vorbildfunktion ausüben, und das Ansehen und den Gebrauch des Baustoffs in anderen Weltgegenden indirekt fördern.

5 Fissabre, Wilson 2012, S. 212

6 vgl. z. B. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 24

Stampflehm und *Kalkulierte Erosion* – Ein Modell zirkulären Bauens

Maßgeblichen Anteil an der neuen Popularität des Lehmbaus hat die Stampflehmtechnik – was vor allem an den besonderen ästhetischen Qualitäten liegt, welche diese mit sich bringt. Stampflehmwände werden für ihre archaische Anmutung sowie die charakteristische Ablesbarkeit ihres Schichtenaufbaus geschätzt, und aus diesen Gründen in aller Regel sichtig belassen. Dabei sind sogar frei bewitterte Außenwände erstellbar. Auf eine zusätzliche Bekleidungs-schicht kann – ganz im Sinne eines „einfachen“ Bauens – verzichtet werden, da Stampflehm eine relativ hohe Beständigkeit gegen Erosion aufweist. Diese liegt vor allem in seiner grobkörnigen Zusammensetzung begründet (siehe Kap. 3).

Der österreichische Stampflehm-Experte Martin Rauch hat einen besonderen Umgang mit dem Material geprägt, für den er den Begriff *Kalkulierte Erosion* verwendet. Er plädiert dafür, ein gewisses Maß der Erosion zu akzeptieren und bei der Planung mit einzukalkulieren, Gebäude nicht „härter“ zu bauen als unbedingt notwendig, vielmehr Veränderungsprozesse zuzulassen, und auf diese Weise eine unnötige Bindung von Ressourcen zu vermeiden.

Die Idee der kalkulierten Erosion fordert somit gleichsam einen Bewusstseinswandel. Zudem hat sie eine ästhetische Dimension: durch die Bewitterung wird die Wandoberfläche mit der Zeit rauher und gewinnt zunehmend an Ausstrahlung. So entfaltet das Material erst durch die Ermöglichung der Erosion seine volle Wirkung (Abb. 1-3).

Diese Akzeptanz und gar Wertschätzung von Alterung ist nicht neu im Bereich der Architektur. Man kennt sie etwa von unbehandelten Holzfassaden, welche mit der Zeit vergrauen. So spricht Herrmann Kaufmann von einem: „[...] *kontinuierlichen Prozess, in dem das Holz ganz gleichmäßig von Braun ins leicht grau Schimmernde, ins Hellgrau bis ins Dunkelgrau übergeht.*“ (Kaufmann 2001, S. 19) Die „*sensorische Tiefe*“⁷, welche manche Oberflächen mit der Zeit annehmen, verleiht Gebäuden mitunter eine besondere Wertigkeit.

Auch im Bereich der Kunst, vor allem östlicher Kulturen, lassen sich Parallelen zu einer solchen Betrachtung stofflicher Alterung finden. Im japanischen Stilprinzip des *Wabi-Sabi* etwa werden Wandel, Vergänglichkeit und Zerbrechlichkeit zum ästhetischen Ideal



Abb. 1-3: Haus Rauch, Schlins, Österreich, 2008

erhoben, der Zerfall von Materie zelebriert. Aus diesem Grund bevorzugen Wabi-Sabi-Künstler schlichte, natürliche Materialien, denen man ihre Alterung ansieht. Nicht zufällig gilt auch der Baustoff Lehm in Japan als Material für höchste Ansprüche.⁸

In der westlichen Kultur spielt das Thema Vergänglichkeit ebenso eine Rolle, zum Beispiel in modernen Kunstströmungen wie der *Arte Povera*, deren Vertreter Wandlungsprozesse thematisierten und an der Überwindung des tradierten Verständnisses der Wertigkeit von Materialien arbeiteten. Auch sie interessierten sich vor allem für alltägliche, „arme“ Materialien. So hat Mario Merz mit seinen Variationen zum Iglu – für ihn der Urtyp menschlicher Behausung – Objekte geschaffen, die zugleich Dauer und Flüchtigkeit verkörpern (Abb. 1-4). Konkret mit dem Material Lehm arbeitete der US-amerikanische Künstler Donald Judd, welcher in den 1970er Jahren in Marfa, Texas, Wände aus (Adobe-)Lehmsteinen erstellte (Abb. 1-5). Judd, in dessen Werk das Zusammenspiel traditioneller und industrieller Materialien ein besonderes Thema ist, vermauerte die Steine nicht wie üblich mit Lehm-, sondern mit Kalkmörtel. Während die Oberflächen der Lehmsteine mit der Zeit ausgewaschen wurden, hielt der Kalkmörtel der Verwitterung stand, wodurch die Fugen aus der Wand hervortreten, und die fragile Seite des Baustoffs betont wird.

⁷ Weidinger 2003, S. 8

⁸ vgl. Speidel 1985, S. 58 f.

Wie bei Judd deutlich wird, ist die Erosion beim Material Lehm weit mehr als ein oberflächliches Phänomen – sie betrifft in weit größerem Maße als bei schlichter Patina die Substanz des Gebäudes. Auch ist sie keine reine Verfallserscheinung, sondern vielmehr Teil des natürlichen Stoffkreislaufs des Lehms, welcher seinen Anfang und ein Ende im Boden nimmt. Für Lehmbauteile, insbesondere Stampflehmwände, kann oftmals vorhandener Bodenaushub als Ausgangsmaterial verwendet werden. In der Regel ist Erdaushub uninteressant sowohl für die Ziegel-, als auch die Kiesindustrie⁹, und wird daher meist in Deponien verbaut. Da Deponiekapazitäten vielerorts knapp werden, muss Aushubmaterial oft weit transportiert werden, wodurch nicht nur hohe Kosten entstehen, sondern auch viel CO₂ freigesetzt wird. Dabei ließe sich das Material, welches in großen Mengen und prinzipiell kostenlos zur Verfügung steht, direkt für den Bau wiederverwenden.¹⁰ Am Ende der Lebensdauer des Gebäudes kann der Baustoff zudem sehr einfach von anderen ge-

- 9 Für die Herstellung gebrannter Ziegel ist der Sand- und Kiesanteil zu hoch, für die Gewinnung von Sand und Kies wiederum der Feinanteil. Jeweils ist es unwirtschaftlich, die unerwünschten Anteile auszuwaschen. (vgl. Hilgert 2019, S. 167, Heringer u. a., S. 105)
- 10 Damit wird nicht zuletzt auch eine Abhängigkeit von zunehmend knapper werdenden Baustoffen wie Sand oder Kies gemindert. In Paris wird dies derzeit im größeren Maßstab erprobt. Hier entsteht in den kommenden 10 Jahren ein neues städtisches Quartier (siehe auch Kap. 3, S. 84) größtenteils in Lehmbauweise, für welches Erdaushub verwendet wird, der parallel beim Bau einer neuen Metrolinie anfällt. (vgl. Gasnier 2019)



Abb. 1-4: Mario Merz, Igloo di Pietra, Kröller-Müller-Museum, Niederlande, 1982



Abb. 1-5: Donald Judd, Adobe-Wand, Marfa, Texas, 1977

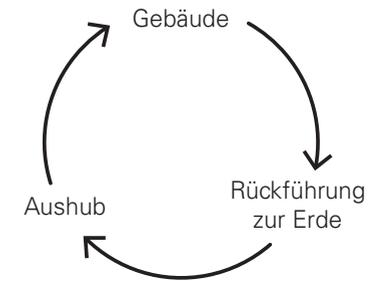


Abb. 1-6: Materialkreislauf (Schema)

trennt, bedenkenlos wieder dem Boden zugeführt, oder aber direkt wiederverwendet werden (Abb. 1-6). Und dies grundsätzlich unbegrenzt oft, sowie ohne Qualitätsverlust. So ist der vermeintliche Nachteil der Wasserlöslichkeit in Wahrheit ein großer Vorteil, da er dem Lehm (neben weiteren positiven Eigenschaften) erst diesen Kreislauf ermöglicht.¹¹ Zudem ist Wasser das letztendliche Bindemittel des Lehms (siehe Kap. 3), und somit im Grunde „mehr Freund als Feind“¹² des Lehmbaus.

Im Sinne von Günther Moewes ermöglicht Lehm also ein Bauen ohne jegliche materielle, und mit nur sehr geringer energetischer Entropie.¹³ Das heißt, es findet weder ein „Downcycling“ des Materials statt, noch wird zu seiner Wiederaufbereitung eine signifikante Menge an Energie benötigt. Diese Vorteile veranlassen auch führende Ökonomen dazu, dem Baustoff Lehm eine große Bedeutung auf dem Weg hin zu einer Kreislaufwirtschaft zuzumessen.¹⁴

11 vgl. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 48

12 Wilson 2019, S. 360

13 vgl. Moewes 1995, S. 12, 69 ff.

14 vgl. Dethier 2019, S. 12 f.

In ihrem Buch „Bâtir en Terre. Du grain de sable à l’architecture.“ (dt. „Bauen mit Erde. Vom Sandkorn zur Architektur.“), zeigen Anger und Fontaine das Bild einer Siedlung aus Lehmhäusern am Fuße einer Bergformation im Jemen (Abb. 1-7). Hier erodiert der Fels über die Zeit, und aus dem verwitterten Material entsteht Architektur. Diese Bauten sind nur so widerstandsfähig wie nötig ausgeführt, und können jederzeit wieder sehr einfach zur Erde zurückgeführt werden. Aufgrund der kontinuierlichen Prozesse der Abtragung sind die Formen vergänglich, Natur und Kultur verschmelzen nahtlos miteinander. Die Architektur schreibt sich in größere, geologische Kreisläufe ein. Der hier zu einem Bild verdichtete, natürliche Kreislauf des Materials Lehm kann idealtypisch für ein ressourcenschonendes Bauen stehen.

Auch in einer Fotografie des frisch fertiggestellten Ricola Kräuterzentrums (Herzog & de Meuron, 2012) verbildlicht sich dieser Stoffkreislauf (Abb. 1-8, S. 22). Die Wand erhebt sich aus dem Boden, ist selbst geschichtete, verdichtete Erde, und wird durch den Erosionsprozess, sowie schließlich durch Rückbau, nach Ablauf der Gebäudenutzungsdauer, wieder zu diesem zurückkehren. So spiegelt sich im Lebenszyklus der Stampflehmwand das Große im Kleinen. Über das Haus Rauch, bei dem die Wände aus dem Bodenaushub für das Kellergeschoss gestampft wurden, schrieb Axel Simon: „Ist [...] (es) eine geometrische Form, die in den Hang gestellt wurde? Oder ist es die Erde des Hanges, die geometrisch geformt wurde?“¹⁵

Der Stoffkreislauf des Lehms steht jedoch in keinerlei Widerspruch zur grundsätzlichen Dauerhaftigkeit der Konstruktion, welche einen ebenso wichtigen Nachhaltigkeitsaspekt darstellt. Eine sorgsame Anwendung vorausgesetzt, ist Stampflehm außerordentlich langlebig, wie zahlreiche historische Beispiele bezeugen (siehe Kap. 3). Der im Sinne der kalkulierten Erosion zugelassene Veränderungsprozess muss dabei nicht als negativ besetzter Verfall, sondern kann vielmehr als der ästhetischen Qualität des Gebäudes zuträglich begriffen werden. Über die materielle Dauerhaftigkeit hinaus ist diese *ästhetische Dauerhaftigkeit* des Stampflehms besonders hervorzuheben. „Denn“, wie Fischer und Schindel schreiben, „was ist nachhaltiger als ein Bau, der gut und schön altert?“¹⁶

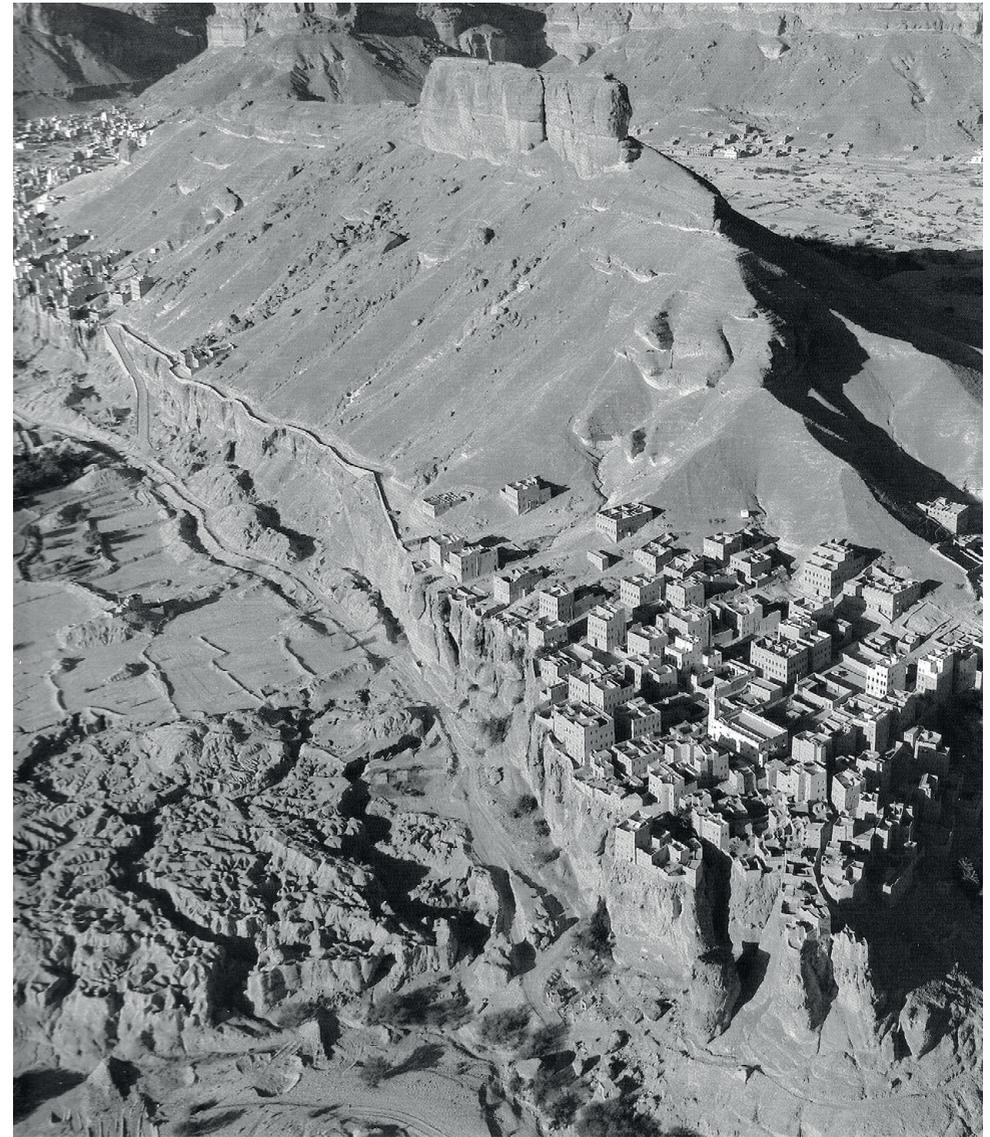


Abb. 1-7: Siedlung von Lehmhäusern, Wadi Doan, Jemen

¹⁵ Simon 2010, S. 34

¹⁶ Fischer, Schindel 2019, S. 23

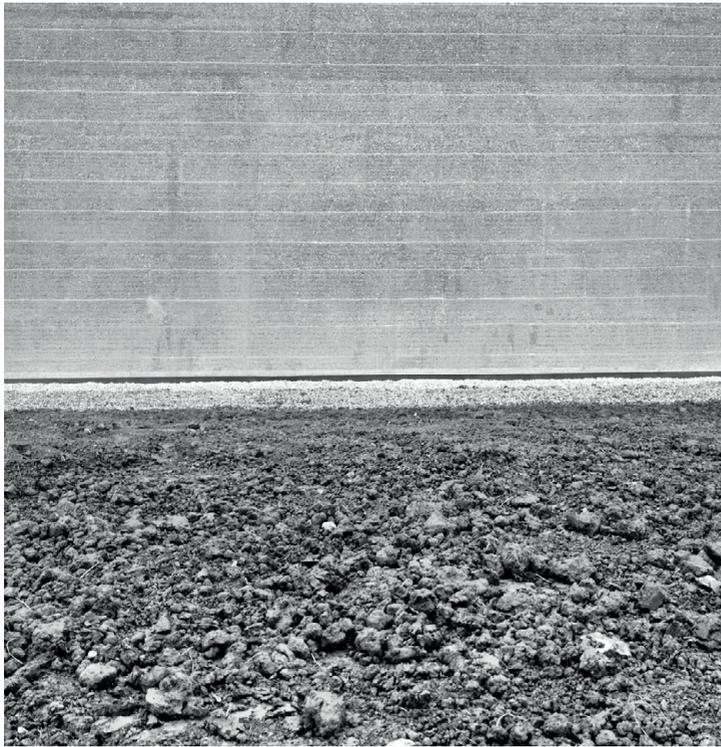


Abb. 1-8: Ricola Kräutlerzentrum, Laufen, Schweiz

Zukunft der Bautechnik

Ein weiterer Aspekt, welcher für die Verbreitung des Baustoffs hierzulande eine wichtige Rolle spielen könnte, ist die Weiterentwicklung von Bauweise und Bautechnik. Derzeit erlebt der Stampflehmbau einen Trend von der traditionellen Vor-Ort-Bauweise hin zur Vorfertigung von Bauteilen und -elementen. Deren Vorteile, darunter die Ermöglichung kürzerer Bauzeiten, zeigen sich zunehmend in größeren Bauvorhaben, oder machen diese erst ökonomisch realisierbar. Verwendet werden in aller Regel Großblöcke mit einem Gewicht von mehreren Tonnen, welche jeweils projektspezifisch im Werk gefertigt werden.

Mit Blick auf eine mögliche Breitenanwendung etwa im Wohnungsbau, welche mittel- bis langfristig realistisch erscheint,

liegt es nicht fern, an eine Weiterentwicklung dieser Vorfertigungspraxis in Richtung einer kleinteiligeren Elementierung und Standardisierung von Bauelementen, also eines modularen Systems zu denken. Die Entwicklung einer solchen *Stampflehm-Mauerwerksbauweise* wurde bislang jedoch kaum betrieben. Dies mag zum Teil daran liegen, dass Stampflehmwände gerade wegen ihres monolithischen Ausdrucks geschätzt werden, welcher der Vor-Ort-Bauweise oder auch dem Bauen mit vorgefertigten Großblöcken entspricht.¹⁷ Jedoch besteht bislang auch kaum realer Bedarf, welcher Investitionen in die Entwicklung fördern würde.

Das Potential der Mauerwerksbauweise hingegen erscheint groß. Gegenüber der projektspezifischen Vorfertigung großformatiger Blöcke hätte die Modularisierung vor allem eine weitere Ökonomisierung sowie Flexibilität bei Herstellung, Planung und Ausführung zur Folge. Während kleinformatisches Mauerwerk unter anderem für den Selbstbau¹⁸ oder das Bauen im Bestand interessant erscheint, wird vor allem in großformatigem Elementmauerwerk Potential für eine breitere Anwendung gesehen. Eine automatisierte Herstellung wäre bereits heute mit relativ geringen Mitteln umsetzbar (siehe Kap. 3). Da solche Elemente wesentlich einfacher zu handhaben wären als heute übliche Großblöcke, und auch vorhandene Werkzeuge aus dem Großformat-Mauerwerksbau verwendet werden könnten, für die keine speziellen Kenntnisse und Erfahrungen notwendig sind¹⁹, würde umgekehrt auch eine breitere Anwendung vereinfacht. Zudem könnte die Mauerwerksbauweise dabei helfen, die Integrierbarkeit des Baustoffs in andere Konstruktionsweisen zu verbessern.²⁰

¹⁷ Bei letzterem werden die Fugen in der Regel nachträglich retuschiert.

¹⁸ Aspekte des Selbstbaus haben traditionell eine besondere Bedeutung innerhalb des Lehmbaus. Vgl. Fissabre, Wilson 2012, S. 210

¹⁹ vgl. Dahmen, Muñoz 2015, S. 80

²⁰ vgl. Hall, Swaney – European Modern Earth Construction, in: Hall, M., Lindsay, R. and Krayenhoff, M. (Hg.) – Modern Earth Buildings Cambridge UK: Woodhead Publishing 2012, S. 654, zitiert in: Dahmen, Muñoz 2015, S. 80

1.2 Ausgangsfragestellung

Die Leitbilder der kalkulierten Erosion und des Stoffkreislaufs auf Ebene der Ästhetik und Ökologie, sowie die Mauerwerksbauweise auf Ebene der Technik, könnten einen wichtigen Beitrag dazu leisten, den Stampflehm-Bau in Europa und der Welt weiter zu verbreiten, und hierdurch helfen, die negativen Auswirkungen des Bausektors auf die Umwelt zu reduzieren.

Dabei wird vor allem in der zusammenhängenden Betrachtung beider Themen – konkret in der Untersuchung einer Übertragung des Prinzips der kalkulierten Erosion auf die Mauerwerksbauweise – eine vielversprechende Entwicklungsrichtung gesehen. Aufgrund der speziellen Rahmenbedingungen bei Mauerwerk, etwa mit der Elementierung einhergehender, neuer Möglichkeiten der Herstellung, aber auch spezieller Erfordernisse der Bauweise, bietet sich diese Übertragung in besonderer Weise an. In der Anwendung der kalkulierten Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk wird daher großes Potential gesehen.

Ausgehend von dieser Vermutung soll im Rahmen der Arbeit untersucht werden, auf welche Weisen der beschriebene Transfer erfolgen kann. Hierbei sollen sowohl das Element der Erosionsbremse und dessen bewährte Funktionsweise, als auch weitere Strategien und Hilfsmittel Beachtung finden. Im Vordergrund steht die integrative Betrachtung funktionaler und ästhetischer Aspekte des Gebrauchs, also der Zusammenhänge zwischen Erosionsschutz und Bauteilgestalt. Auch herstellungstechnische Fragen spielen hierbei eine wichtige Rolle.

1.3 Aufbau und Methoden

Die Arbeit untergliedert sich grob in drei Teile (siehe Abb. 1-9, S. 26).

Dieses und das folgende Kapitel, in dem der derzeitige Stand der Forschung und Technik dargelegt wird, bilden den einleitenden Teil.

Der Hauptteil der Arbeit beginnt mit Kapitel 3, in welchem die Grundlagen einer Stampflehm-Mauerwerksbauweise skizziert werden, Basiswissen zum Thema der Erosion zusammengestellt, und somit das Fundament für die weiteren Untersuchungen gelegt wird. Hierauf aufbauend, folgt in Kapitel 4 die Dokumentation des ersten Teils der Untersuchungen, welcher den Einstieg in die Auseinandersetzung mit der konkreten Fragestellung bildet. Diese Untersuchungen haben eher explorativen Charakter und sind geprägt durch ein enges Zusammenwirken entwerflicher Studien und praktischer Erprobungen anhand von Testaufbauten. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse führen schließlich zu einer Eingrenzung der Ausgangsfragestellung. Der zweite Teil der Untersuchungen, welcher in Kapitel 5 behandelt wird, ist hingegen gekennzeichnet durch eine konfirmatorische Vorgehensweise. Hier erfolgt die vertiefte, systematische Betrachtung eines konkreten Mittels der Umsetzung kalkulierter Erosion durch die Erarbeitung eines Ordnungssystems, sowie hierauf basierender Anwendungsstudien.

Eine Diskussion der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf mögliche Anschlussforschung bilden den Abschluss der Arbeit.

Einem ganzheitlichen Ansatz folgend, werden in der Arbeit unterschiedliche Forschungsansätze verknüpft: von theoretischer Grundlagenforschung bis hin zur Anwendung und Überprüfung von Erkenntnissen in Entwurf als auch praktischer Umsetzung. Dabei werden Problemstellungen untersucht, welche verschiedene Fachgebiete tangieren.



Abb. 1-9: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Stand der Forschung

Nach Kenntnisstand des Autors existieren bis dato keine umfangreicheren Forschungsprojekte, welche sich dem Thema Stampflehm-Mauerwerk oder auch der kalkulierten Erosion direkt widmen. Die vorliegende Arbeit baut daher weitestgehend auf dem derzeitigen Stand der Technik (siehe Abschnitt 2.2, unten) auf.

Im Folgenden sollen jedoch einige Projekte angesprochen werden, welche den größeren Forschungskontext umschreiben.

Stampflehmbau und Lehmsteinbau

Den Stampflehmbau allgemein betreffend, ist zunächst ein bislang unveröffentlichtes Forschungsprojekt der Firma Lehm Ton Erde (Martin Rauch) zu erwähnen. Unter dem Titel: „Vorgefertigte, tragende Systembauweise aus nicht stabilisiertem Stampflehm“ wurde zwischen 2018 und 2019, unterstützt von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft und der Vorarlberger Landesregierung, das Bauen mit raumhohen Wandmodulen untersucht.¹ Ähnliche Forschungen wurden von Ružicka et al. über mehrere Jahre an der CTU Prag unternommen. Hier lag der Fokus auf der Untersuchung der mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften vorgefertigter Stampflehm-Bauteile zur Erstellung von Geschossdecken und Innenwänden.²

In Deutschland läuft aktuell ein mit Mitteln der Forschungsinitiative *Zukunft Bau* des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördertes Projekt unter der Leitung von Prof. Kloft an der TU Braunschweig, in welchem eine neuartige, automatisierte Herstellung großer Stampflehmteile untersucht wird, bei der auf herkömmliche, starre Schalung verzichtet werden kann.³ In einem weiteren vom BBSR geförderten Projekt unter der Leitung von Prof. Jäger (TU Dresden) wurde die Anwendung ungebrannter und getrockneter Steine aus der Ziegelindustrie untersucht.⁴ (Abb. 2-1, nächste Seite)

1 vgl. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 114, sowie Simon 2018, S. 18 f.

2 vgl. Ružicka, Havlik 2012

3 vgl. Deutsche Bauzeitschrift DBZ 2019

4 vgl. Jäger, Hartmann 2019



Abb. 2-1:
Forschungsprojekt
Lehmmauerwerk, TU Dresden

Materialforschung

Intensive Forschungsarbeit findet derzeit auf dem Gebiet der Materialforschung statt. Hierzu zählen z. B. Forschungen zu so genanntem „Flüssiglehm“ oder „Lehmbeton“, u.a. an der ETH Zürich⁵, welcher eine vielversprechende, weil potentiell kostengünstigere Alternative zu Stampflehm darstellt. Bislang erfolgt hier meist noch die Beigabe chemischer Dispersionsmittel sowie von Zement, allerdings laufen Forschungen zu natürlichen Dispersionsmitteln⁶, als auch Alternativen zu Zement⁷.

Zu den neueren Dissertationen auf dem Gebiet des Lehmbaus in Deutschland zählt die Arbeit von Janson, welche sich mit der Erstellung einer Methodik zur Optimierung von Stampflehm-mischungen beschäftigt.⁸ Diese berücksichtigt dabei primär Materialeigenschaften wie Druckfestigkeit, Schwindmaß, oder Verarbeitbarkeit, jedoch nicht Feuchte- bzw. Witterungsbeständigkeit.

Weitere, in engerem Sinne relevante Forschungsarbeiten und Publikationen werden in Kap. 3 näher besprochen.

5 vgl. Landrou, Brumaud, Habert 2019, S. 209

6 vgl. Guillaud 2019, S. 33

7 vgl. Anger, Fontaine 2018, S. 76

8 vgl. Janson 2013

2.2 Stand der Technik

Wie angedeutet, ist die Stampflehm-Mauerwerksbauweise bislang kaum entwickelt. Es besteht keinerlei aktuelle Baupraxis, und realisierte Objekte aus der Vergangenheit sind so gut wie nicht dokumentiert. Einige wenige Vorläufer bzw. Referenzen werden in Kap. 3 besprochen.

Nicht zu verwechseln ist Stampflehm-Mauerwerk mit dem heute gebräuchlichen Lehmsteinbau, welcher seit 2013 wieder per DIN geregelt ist.⁹ Handelsübliche, industriell hergestellte Lehmsteine (Abb. 2-2) sind in ihrer materiellen Zusammensetzung deutlich feinkörniger als Stampflehm, und aufgrund dessen nicht für den bewitterten Einsatz geeignet.

Auch beim Bauen mit vorgefertigten Stampflehmblöcken handelt es sich nicht um Mauerwerk im engeren Sinne. Hier kommen in aller Regel große Fertigteile zum Einsatz, welche jeweils projektspezifisch dimensioniert und hergestellt werden.

Was das Thema der kalkulierten Erosion angeht, so wird der Stand der Technik zu einem großen Teil durch die Arbeit von Martin Rauch dargestellt, welcher in langjähriger Erfahrung in der Realisierung von Stampflehmgebäuden grundlegende Praktiken Schritt für Schritt weiterentwickelt hat. Hinzu kommt der überlieferte Wissensstand zu traditionellen Techniken. Diese Grundlagen werden in Kap. 3 ausführlich behandelt.

9 vgl. DIN 2018-2 sowie DIN 2018-3

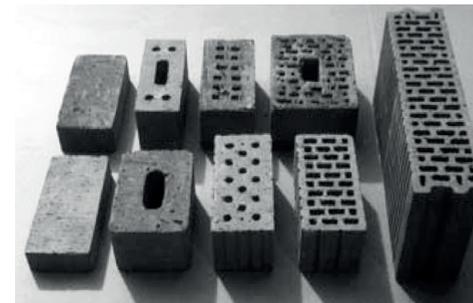


Abb. 2-2: Auswahl handelsüblicher Lehmsteine



Abb. 2-3: Stabilisierter Lehmstein (Fa. Terrabloc)

Nicht Gegenstand der Untersuchungen ist der reine, absolute Schutz vor Erosion, welcher etwa durch die Stabilisierung des Lehms mittels Zement, Kalk oder synthetischer Zusatzstoffe erreicht werden kann. Diese Stabilisierung ist heute z. B. in den USA oder Australien sehr verbreitet und findet auch bei der industriellen Herstellung von Lehmsteinen Anwendung.¹⁰ (Abb. 2-3) Sie führt jedoch zu einer schlechteren Energiebilanz und Rezyklierbarkeit des Baustoffs, wie auch zur Beeinträchtigung weiterer positiver Eigenschaften, wie etwa seiner Atmungsaktivität.

¹⁰ vgl. z. B. Fa. Terrabloc (<http://www.terrabloc.ch>)

3 Grundlagen

3.1 Stampflehmbau

3.1.1 Geschichtliche Einführung

Das Bauen mit Lehm zählt zu den ältesten Konstruktionsweisen des Menschen und geht zurück auf ca. 9000 v. Chr.¹ Als frühestes Zeugnis der Stampflehmbauweise gelten Fundamente, die in Assyrien freigelegt wurden, und auf etwa 5000 v. Chr. datiert werden können.² Zur Einführung des Stampflehmbaus in Europa gibt es verschiedene Theorien. Entweder geht er zurück auf die Römer, oder aber die Mauren brachten ihn im 9. Jh. mit, wofür etwa die Herkunft der spanischen Bezeichnung *Tapia* (von arab. *tabiyya*) spricht. Besonders auf der iberischen Halbinsel fand der Stampflehmbau weite Verbreitung. Als berühmtestes Beispiel maurischer *Tapia*-Architektur gilt die Alcazaba der Alhambra in Granada (Abb. 3-1), welche im 13./14. Jh. errichtet wurde. Heute weist die Region die größte Konzentration erhaltener Stampflehmbauten in Europa auf.³

Von Spanien aus gelangte die Stampflehmbauweise nach Frankreich, wo etwa im 13. Jh. die „Pisé“-Bauweise (von *pisar*, span.: stampfen) entstand. Vor allem im 16. und 17. Jh. fand diese

1 vgl. Minke 2006, S. 11

2 Ebd.

3 vgl. Mileto 2011



Abb. 3-1: Alhambra, Granada



Abb. 3-2: Landwirtschaftsenssemble „Grange Neuve“, Francheleins, Frankreich

in der Gegend um Lyon weite Verbreitung.⁴ Eine wesentliche Rolle hierbei spielte der französische Architekt und Unternehmer François Cointereaux (1740–1830). Dieser veröffentlichte 1790 mit „*L'école d'architecture rurale*“ ein Standardwerk zur Pisé-Bautechnik, welches sich vor allem an die ländliche Bevölkerung richtete und die Eignung des Stampflehmbaus als Selbstbautechnik hervorhob. Besonders erwähnenswert unter den erhaltenen, gebauten Beispielen sind jedoch die großen Scheunengebäude, welche zu Beginn des 20. Jh. in der Region entstanden (Abb. 3-2).

Bereits 1793 erschien eine deutsche Übersetzung von Cointereaux's Schrift und führte den Stampflehm in Deutschland ein, wo Lehm bis dahin überwiegend für die Ausfachung und den Verputz von Fachwerkhäusern eingesetzt worden war.⁵ Zur Bekanntheit der Stampflehmweise in Deutschland trug ebenso der Architekt David Gilly bei, welcher 1797 sein *Handbuch der Landbaukunst* veröffentlichte, in der er diese als vorteilhafteste aller Lehmbaumweisen beschrieb.⁶ In der Folge wurden vor allem in Weilburg an der Lahn, nahe Koblenz, zahlreiche Gebäude aus Stampflehm errichtet. Hier steht noch heute ein Wohnhaus, welches über eine fünfgeschossige, tragende Außenwand aus Stampflehm verfügt, und als höchstes seiner Art in Europa gilt⁷ (Abb. 3-3).

Im 19. Jh. wurde der Lehm in im Zuge der Industrialisie-

4 vgl. Boltshauser 2019, S. 157

5 vgl. Minke 2001, S. 17

6 vgl. Minke 2006, S. 13

7 vgl. Minke 2001, S. 19

rung zunehmend verdrängt. Nach einer längeren Zeit der Vergessenheit erlangte er in Deutschland erst nach dem ersten und dem zweiten Weltkrieg jeweils für kurze Zeit Beachtung. Um industrielle Baustoffe zu sparen, griff man auf Lehm zurück, welcher sich zudem gut für den Selbstbau eignete.⁸

Seit etwa 1980 erlangt der Lehm auf Grund des aufkeimenden ökologischen Bewusstseins wieder neue Aufmerksamkeit und wird zunehmend auch wegen seines positiven Einflusses auf das Raumklima geschätzt.⁹ Vor allem der Gruppe *CRAtterre*, welche sich 1979 an der Universität von Grenoble (Frankreich) als interdisziplinäres Forschungs- und Ausbildungsprojekt gründete, und bis heute weltweit Anerkennung genießt, ist viel Entwicklungsarbeit im Bereich des Lehmbaus zu verdanken.

8 vgl. Speidel 1985, S. 56; Güntzel 1986, S. 156 ff.

9 vgl. Minke 2001, S. 19



Abb. 3-3: Gebäude in Weilburg an der Lahn, 1828



Abb. 3-5: Haus Rauch, Schlins, Österreich, 2008



Abb. 3-4: Kapelle der Versöhnung, Berlin, 2000



Abb. 3-6: Ricola Kräuterzentrum, Laufen, Schweiz, 2012

Seit etwa um die Jahrtausendwende erlebt speziell der Stampflehm eine Renaissance. Dazu trägt maßgeblich Martin Rauch bei, welcher in Zusammenarbeit mit teils renommierten Architekturbüros Gebäude realisiert, die dem Baustoff zu einem neuen, zeitgemäßen architektonischen Ausdruck verhelfen. Im Jahr 2000 wurde mit der Kapelle der Versöhnung in Berlin der erste „moderne“ Stampflehm-Neubau in Deutschland realisiert (Abb. 3-4). 2008 stellte Rauch mit dem Architekten Roger Boltshauser sein privates Wohnhaus in Schlins, Österreich, fertig (Abb. 3-5). In Kooperation mit Herzog & de Meuron entstand 2012 eine große Produktions- und Lagerhalle für Ricola in Laufen, Schweiz (Abb. 3-6), bei der vorgefertigte Stampflehm-Elemente zum Einsatz kamen. Als erstes größeres Gebäude in Deutschland, bei dem Stampflehm in freier Bewitterung eingesetzt wurde, eröffnete schließlich 2019 der neue Firmensitz von Alnatura in Darmstadt.

3.1.2 Baustoff und Bautechnik

Lehm bezeichnet im Allgemeinen ein Gemisch aus Kies, Sand, Schluff und Ton. Je nach Bautechnik (Lehmsteinbau, Wellerbau¹⁰, Stampflehm, etc.) sind diese Bestandteile in unterschiedlichen Anteilen in der jeweiligen Mischung enthalten. Hierbei spricht man von der *Korngrößenverteilung* oder *Körnungslinie*. Mischungen mit einem geringem Tonanteil werden als *mager*, solche mit einem hohem Tonanteil als *fett* bezeichnet.

Zur optimalen Verarbeitung ist je nach Bautechnik zudem ein bestimmter Wasseranteil notwendig. Ihre letztendliche Festigkeit erreichen Lehmbauteile dann allein durch Trocknung an der Luft. Der Ton – genauer gesagt die Restfeuchte im Lehm, welche Kapillarbrücken zwischen den Tonpartikeln bildet – fungiert hier als Bindemittel. Aufgrund seiner Wasserlöslichkeit weist Lehm zahlreiche baubiologische Vorteile gegenüber anderen Baustoffen auf. Zu diesen zählt z. B. eine hohe Sorptionsfähigkeit, d. h. die Fähigkeit, Feuchtigkeit schnell aus der Raumluft aufnehmen und wieder an diese abgeben zu können.

¹⁰ Der Wellerbau bezeichnet eine traditionelle Lehmbautechnik, bei der mit Stroh vermischter, feinkörniger Lehm lagenweise zu massiven Wänden geschichtet wird. Wellerwände weisen u. a. eine deutlich geringere Rohdichte und somit Tragfähigkeit als Stampflehmwände auf.



Abb. 3-7: Kornzusammensetzung einer Stampflehm-Mischung

Stampflehm ist gekennzeichnet durch einen relativ hohen Kiesanteil und geringen Tonanteil in der Mischung (Abb. 3-7). Aufgrund des geringen Tonanteils ist das Schwindmaß bei Stampflehm deutlich kleiner als bei anderen Lehmbaustoffen. Durch den hohen Steinanteil wiederum erhält er seine hohe Druckfestigkeit. Wegen seiner Grobkörnigkeit wird Stampflehm mitunter auch als Erdbeton bezeichnet. Seine Konsistenz jedoch erinnert eher an Stampfbeton als an herkömmlichen, fließfähigen Beton. Im verdichtungsfähigen Zustand lässt sie sich am besten als erdfeucht-krümelig beschreiben.

Traditionelle Bauweise

Für die Erstellung von Stampflehmwänden wird die erdfeuchte Mischung lagenweise in Schalungen verdichtet. Durch den Prozess des Stampfens wird eine maximale Kompression des körnigen Materials erreicht. Der traditionelle Herstellungsprozess ist z. B. durch Cointereaux dokumentiert (Abb. 3-8, nächste Seite). Beginnend auf einem massiven, wasserfesten Sockel wird die Stampflehmmischung lagenweise in eine Holzschalung gefüllt und mit Handstampfern verdichtet. Sobald das obere Ende der Schalung erreicht wird, kann diese demontiert und seitlich versetzt werden, um mit der Erstellung der Wand seitlich fortzufahren. Heute wird im Wesentlichen die gleiche Methode angewandt, meist jedoch unter Verwendung moderner Stahl-Systemschalungen. Als Stampfwerkzeuge kommen pneumatische oder elektrische Handstampfer oder

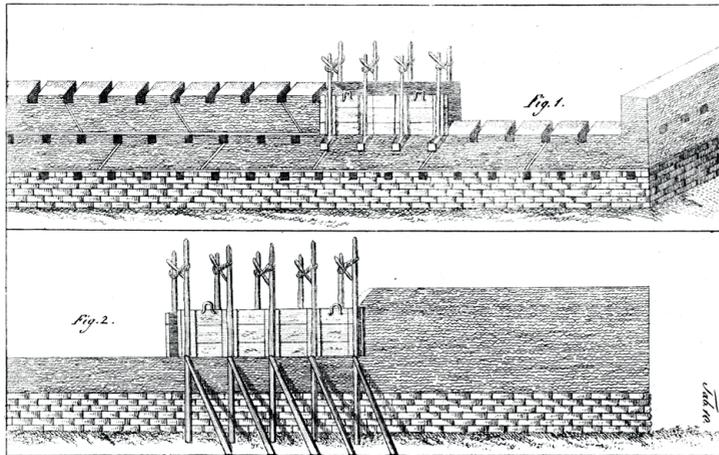


Abb. 3-8: Die traditionelle Pisé-Bautechnik. Aus Cointereaux: „L'école d'architecture rurale“, 1790

Schafffußwalzen, welche im Straßenbau üblich sind, zum Einsatz.

Das Ausschalen ist unmittelbar nach dem Stampfvorgang möglich, da die verdichtete Erde bereits eine hierzu ausreichende Festigkeit aufweist. Zum Erreichen ihrer maximalen Festigkeit und Belastbarkeit muss die Wand zunächst komplett trocknen (bzw. ihre Ausgleichsfeuchte annehmen). Die komplette Durchtrocknung ist ebenso wichtig für die Erosionsbeständigkeit der Wand im Falle direkter Bewitterung. Die Trocknungsdauer beträgt, abhängig von Wanddicke, Lufttemperatur, Luftfeuchte, sowie ggf. Luftbewegung, in der Regel mehrere Wochen.

Vorfertigung

Seit einigen Jahren werden Stampflehmbauten, vor allem größere Bauvorhaben, zunehmend mittels vorgefertigter Elemente realisiert. Die Vorfertigung bietet viele Vorteile. Anders als bei der Vor-Ort-Bauweise ist etwa eine Produktion auch im Winter möglich. Zudem muss die zeitintensive Trocknung nicht auf der Baustelle erfolgen, sondern kann vorverlegt werden, was zu deutlichen Bauzeitverkürzungen führt.

Die Firma Lehm Ton Erde (Martin Rauch) hat die Vorfertigung im Zuge mehrerer Großprojekte zur Reife gebracht. In einer eigens entwickelten Fertigungsanlage wird eine bis zu 50 m lange Wand durchgängig gestampft und anschließend in einzelne Blöcke

zerteilt. Ein sogenannter Beschicker füllt die Stampflehmmischung 16-lagig in die Schalung, nach jeder Lage wird mit Handstampfern und Walzen bis zu einer Höhe von 1,30 m verdichtet. Nach Umlagerung und Trocknung der Lehmblöcke können diese schließlich auf der Baustelle per Kran versetzt werden (Abb. 3-10). Größe und Gewicht der vorgefertigten Elemente sind dabei durch die Kapazität der in der Produktionsstätte vorhandenen Kräne begrenzt. In der jüngsten Entwicklungsstufe weist die Anlage einen noch höheren Automatisierungsgrad auf. An den Beschicker angegliedert sind verschiedene Stampfwerkzeuge, die die Erde direkt nach dem Einfüllen verdichten (Abb. 3-9). In der Folge ist wesentlich weniger händische Arbeit notwendig.

Die Fertigungsstraße von Lehm Ton Erde ist komplett zerlegbar und kann somit leicht an verschiedenen Standorten zum Einsatz kommen. Beim Ricola-Projekt etwa befanden sich die Lehmgrube, der Ort der Vorfertigung der Elemente, und die Baustelle im Umkreis von wenigen Kilometern. Beim Bau für Alnatura in Darmstadt (vgl. S. 38) konnte die Vorfertigung sogar direkt auf der Baustelle, in einer Art mobiler Fabrik, erfolgen. Erstmals wurden hier auch mehrschalige, kerngedämmte Elemente produziert.

Kaum Auswirkungen hat die Vorfertigung jedoch auf die Gestalt des Gebäudes bzw. der Außenwand. Da meist ein homogenes, monolithisches Erscheinungsbild gewünscht ist, werden die Elementfugen nachträglich retuschiert, sodass sie optisch fast nicht in Erscheinung treten.¹¹ Die Retusche erfolgt durch nachträgliches

¹¹ vgl. Rauch 2015, S. 78

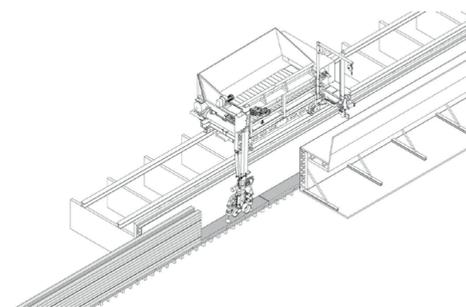


Abb. 3-9: Teil-automatisierte Fertigungsstraße (Fa. Lehm Ton Erde)



Abb. 3-10: Versatz der Elemente auf der Baustelle (Fa. Lehm Ton Erde)



Abb. 3-11: nachträgliche Retusche der Elementfugen

Einarbeiten feuchten Stampflehm-Materials von außen in die Fugen, was allerdings einen hohen Aufwand bedeutet (Abb. 3-11). Besonders arbeitsintensiv ist dies bei den vertikalen Fugen, da hier der Rhythmus der lagenweisen Verdichtung optisch nachgebildet wird.

Konstruktive Grundregeln

Stampflehm kann, ähnlich unbewehrtem Beton oder Mauerwerk, keine Zugkräfte aufnehmen, und ist daher grundsätzlich nur auf Druck beanspruchbar.

Eine essentielle Bedeutung kommt dem konstruktiven Feuchteschutz zu. Aufgrund der Porosität und Kapillarität von Lehm-Baustoffen stellen stehendes Wasser als auch aufsteigende Feuchte ein großes Risiko der Durchfeuchtung, und damit einer kritischen Schädigung des Bauteils dar. Daher sind bei der Erstellung von Wänden die Ausbildung eines wasserfesten Sockels (Spritzwasserhöhe) mit darüber angeordneter, horizontale Sperrlage, sowie die Abdeckung der Mauerkrone zu beachten.

Verwendung von Kalk und Zement im Stampflehm-Bau

Sowohl im traditionellen, als auch im zeitgenössischen Stampflehm-Bau spielt das gute baustoffliche Zusammenspiel mit Kalk eine wichtige Rolle. Im französischen *Pisé-Bau* etwa wurden die Ränder der Schalungsabschnitte traditionell durch dünne Lagen aus Kalkmörtel verstärkt. Heute wird die Integration von Kalkmörtel-lagen in das Wandbauteil vielfach zur Erstellung von Erosionsbremen (siehe S. 73) genutzt. Kalk eignet sich hier besonders gut, da er relativ langsam aushärtet, und daher mit dem Trocknungsprozess von Stampflehm harmonisiert. So kann u. a. die Schwindrisbildung minimiert werden. Durch Beigabe von Trassmehl¹² lässt sich die Aushärtungszeit, und darüber hinaus auch die Festigkeit des Kalkmörtels, zudem weiter erhöhen.

Auch kann Kalk dazu verwendet werden, die Druck- und Wasserfestigkeit von Stampflehm zu erhöhen. Bei der sogenannten *Stabilisierung* (siehe S. 40) wird dem Lehm zwischen 3 und 15% Kalk (hydraulisch oder nicht-hydraulisch), oder etwa 6% Zement beigemischt.¹³ Kalk eignet sich als Stabilisator vor allem für Mischungen mit einem relativ hohen Tongehalt. Bei eher geringem Tongehalt, welcher für Stampflehm typisch ist, erzielt Zement bessere Ergebnisse.¹⁴

Normierung

Stampflehm ist heute ein nur gering normierter Baustoff. Nachdem es nach 1951 in Deutschland zur Einführung einer DIN-Norm für Lehm-Bauten (DIN 18951) gekommen war, wurde diese bereits 1971 ersatzlos zurückgezogen. 1998 brachte der deutsche *Dachverband Lehm* mit den *Lehmbau Regeln* neue technische Richtlinien heraus, die heute in der Praxis Anwendung finden. In den Geltungsbereich der Lehmbau Regeln fallen jedoch lediglich ein- bis zweigeschossige Wände, bei einer Beschränkung der Geschosshöhe auf 3,25 m. Für drei- und mehrgeschossige Gebäude müssen derzeit noch Zustimmungen im Einzelfall erwirkt werden.¹⁵

Aufgrund der geringen Normierung des Baustoffs gibt es bis dato keine allgemein anerkannten Regeln für die Herstellung

¹² Trass ist ein natürliches Puzzolan. Siehe z. B. auch: <http://materialarchiv.ch/#/detail/1480/trasskalk>

¹³ Detaillierte Informationen hierzu finden sich bei Houben und Guillaud: vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 88 ff

¹⁴ vgl. z. B. Walker et al. 2005, S. 125 f.

¹⁵ vgl. Röhlen, Ziegert 2019, S. 193

von Stampflehm-Mischungen mit optimalen Materialeigenschaften. In der Regel werden, unter Verwendung natürlich vorkommender Lehmgemische, je Projekt experimentell Rezepturen erarbeitet, und basierend auf diesen Baustellenmischungen erstellt.¹⁶ Anhaltsgrößen dafür finden sich z. B. bei Schröder und Walker et al.¹⁷ Darüber hinaus sind auch industriell hergestellte Stampflehmmischungen von verschiedenen Herstellern erhältlich.

Materialkennwerte¹⁸

Spezifisches Gewicht:	1,8 – 2,2 t/m ³
Gleichgewichtsfeuchte:	6% – 7%
Druckfestigkeit:	2,4 N/mm ²
Schwindmaß:	0,25 %
Kriechmaß:	0,2 %
Wärmedehnung:	0,005 mm/mK
Wärmeleitfähigkeit:	ca. 0,6 – 1,1 W/mK

3.2 Stampflehm-Mauerwerk

3.2.1 Vorläufer

Wie bereits erwähnt, existieren für den Gebrauch von Stampflehm-Mauerwerk nur sehr wenige Referenzen. Die früheste unter diesen stellt vermutlich Cointeraux dar, dessen Werk heute für viele eine Inspiration ist. Eher wenig Beachtung fand bislang, dass sich Cointeraux auch mit Stampflehm-Mauerwerk beschäftigte. In seinem Buch *L'école d'architecture rurale* beschreibt er neben der traditionellen *Pisé*-Bauweise eine damals neuartige Bauweise, die er den *Neuen Pisé* (*Nouveau Pisé*) nennt. Cointeraux erläutert darin, wie kleinformatige Stampflehm-Elemente effizient in Eigenleistung herstellbar sind und zu massiven Wänden gefügt werden können. (Abb. 3-12) Den Nutzen des *Nouveau Pisé* leitet er vor allem von der Möglichkeit her, vielfältige Gebäudegeometrien bis hin zu gebo-

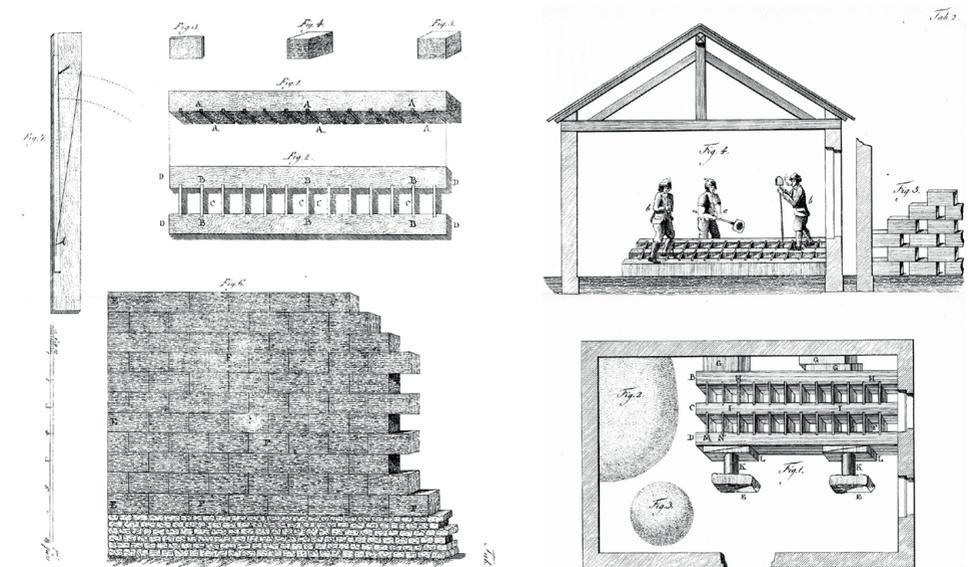


Abb. 3-12: Herstellung von Stampflehm-Elementen nach Cointeraux

¹⁶ vgl. Janson 2013, S. 17

¹⁷ vgl. Schröder 2019, S. 86 ff.; Walker et al. 2003, S. 8 f.

¹⁸ Angaben nach: Rauch 2003, S. 652

genen Wänden oder Gewölben herstellen zu können, welche in der traditionellen Technik nicht oder nur schwer realisierbar wären.

Als Modul des Nouveau Pisé beschreibt Cointereaux einen Quader der Länge von einem Fuß und der Höhe und Breite von neun Zoll, was seiner Erfahrung nach beim Erstellen der Formen, beim Entnehmen und Lagern, als auch beim Vermauern, ein Maß und Gewicht ist, das es einem einzelnen Arbeiter ermöglicht, die Quader „ohne Unbequemlichkeit“¹⁹ zu tragen und zu verarbeiten.²⁰ Diese Abmessungen entsprechen in etwa 32,5 x 24,5 x 24,5 cm²¹, was, je nach Beschaffenheit der verwendeten Erde, ein Gewicht von ungefähr 35 bis 42 kg je Quader bedeutete. Mit diesem Format sollten Wände der Stärke 24,5 cm in Einsteinmauerwerk erstellt werden, wie auf Tafel 1 (Abb. 3-12) gezeigt. Was die Fügung der Steine angeht, so rät Cointereaux zur Verwendung eines sehr dünnen Mörtels aus Kalk und Sand. Alternativ schlägt er vor, anstatt des teuren „Dünnbettmörtels“ einen „ebenfalls sehr dünnen Mörtel aus reiner oder leimiger Erde, ohne Kies“²² zu verwenden.²³ Grundsätzlich sieht er auch die Möglichkeit, die Fügung gänzlich ohne Mörtel auszuführen, da sich die Massen über die Zeit selbst miteinander verbinden würden. Insgesamt geht er beim Nouveau Pisé von geringerer Festigkeit als bei der traditionellen Vor-Ort-Bauweise aus.²⁴

19 Cointereaux 1803, Bd.1, S. 5

20 vgl. Cointereaux 1803, Bd.1, S. 6

21 Diese Maße basieren auf den 1799 festgelegten Umrechnungswerten der französischen Einheiten ins metrische System: 1 Zoll = 2,707 cm, 1 Fuß = 32,48 cm, vgl. [https://de.wikipedia.org/wiki/Alte_Maße_und_Gewichte_\(Frankreich\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Alte_Maße_und_Gewichte_(Frankreich)) – abgerufen am 19.03.2020

22 Cointereaux 1803, Bd. 2, S. 4

23 vgl. Cointereaux 1803, Bd. 2, S. 4-5

24 vgl. Cointereaux 1803, Bd.1, S. 21

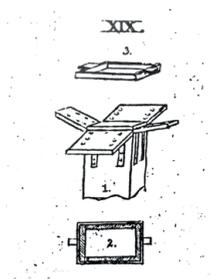


Abb. 3-13:
Form zur Herstellung von
Stamflehmsteinen, Heigelin
1827



Abb. 3-14: Nicolas Meunier, Wohnhaus in Sorbiers,
Frankreich, 1988

Zu gestalterischen Implikationen der neuen Technik stellt Cointereaux keine Überlegungen an, da er davon ausging, dass Pisé-Gebäude im Nachhinein stets verputzt werden.

Wenngleich bislang keine Dokumentation von Bauten existiert, die Cointereaux in Stampflehm-Mauerwerk realisierte, so ist belegt, dass er sich mit der Bauweise nicht nur auf konzeptioneller Ebene auseinandergesetzt hat. Im schweizerischen Fislisbach (Kanton Aargau) etwa wurden Gebäude in der Technik des Nouveau Pisé realisiert.²⁵ Aller Wahrscheinlichkeit nach wurden aber auch diese verputzt.

Darüber hinaus gibt es in der Literatur einige weitere Erwähnungen von Stampflehm-Mauerwerk. So findet sich bei Güntzel²⁶ der Hinweis, dass Marcell Heigelin um 1827 mit Stampflehm-Steinen experimentiert hat (Abb. 3-13). Minke wiederum erwähnt, dass die ehemalige DIN 18951 sogenannte *Lehmquader* mit den Abmessungen 12 x 25 x 38 cm, hergestellt durch Stampfen erdfeuchten, mageren Lehms in Formen, beschrieb.²⁷ Die Anwendung dieser Quader, deren Beschreibung an Stampflehmsteine erinnert, ist hingegen nicht dokumentiert.

In neuerer Zeit hat der französische Architekt und Unternehmer Nicolas Meunier mit großformatigem Mauerwerk experimentiert. Meunier baute 1988 in Sorbiers ein Wohngebäude aus vor-

25 vgl. Menolfi 2019, S. 140

26 vgl. Güntzel 1988, S. 237 f.

27 vgl. Minke 1986, S. 5



Abb. 3-15: Stampflehm-Steine in der Ausstellung „Martin Rauch - Refined Earth“, 2017

gefertigten Stampflehmblöcken, welche deutlich kleiner waren als heute übliche, vorgefertigte Blöcke (Abb. 3-14).²⁸ Das Gebäude weist einen großzügigen Dachüberstand auf und wurde nicht nachträglich verputzt, sodass die Fugen zwischen den Blöcken sichtbar blieben. Der hohe Anteil notwendiger Sondersteine als auch das Fugenbild machen jedoch deutlich, dass der Verwendung vorgefertigter Elemente hier kein modularer Gedanke zugrunde lag.

Auch die Firma Lehm Ton Erde experimentiert mit kleinformatigen Elementen aus Stampflehm. Allerdings wurden bislang (Stand: März 2020) weder Forschungsergebnisse veröffentlicht, noch Bauvorhaben in dieser Technik realisiert. In einer Ausstellung zu seinen Arbeiten 2017 zeigte Rauch jedoch eine räumliche Installation, welche aus einer Anordnung kleinerer Stampflehm-Formate (ca. 20 x 15 x 50 cm) bestand (Abb. 3-15).

3.2.2 Planungsgrundlagen

Zur Vorbereitung der weiteren Untersuchungen werden zunächst einige technisch-planerische Grundlagen zusammengestellt bzw. erarbeitet. Diesen liegt das Szenario einer Breitenanwendung in Deutschland zugrunde.

²⁸ vgl. Nicolas Meunier, *Autre procédé pour la mise en oeuvre de bâtiments en terre compactée*, Grenoble 1987, zitiert in: Witry, Guillaud 2019, S. 77

3.2.2.1 Konstruktive Grundlagen

Wie bei anderen Mauerwerkbauweisen handelt es sich bei Stampflehm-Mauerwerk um eine Massivbauweise, die bestimmte konstruktive Charakteristika, wie etwa das typische Primat der Wand vor der Öffnung, mit sich bringt. Grundregeln des Mauerwerksbaus, wie etwa die Verbandsregeln, sind auch hier anzuwenden.²⁹ Prinzipiell kann Stampflehm-Mauerwerk überall dort Anwendung finden, wo auch monolithische Stampflehmwände eingesetzt werden. Für den Rahmen dieser Arbeit soll jedoch von massiven, tragenden oder nichttragenden Außenwänden ausgegangen werden. Ebenso wird ein Fokus auf den frei bewitterten Einsatz gelegt, da im Weiteren speziell das Thema der Oberflächenerosion untersucht werden soll.

Bezüglich des Wandaufbaus soll von einer raumseitigen Wärmedämmung (mit Lehminnenputz) ausgegangen werden (Abb. 3-16). Die weiteren Untersuchungen sind jedoch grundsätzlich auch auf andere Wandkonstruktionen wie z. B. kerngedämmte Wände (vgl. S. 41) übertragbar.

Was die Wandstärke angeht, so soll das in Deutschland für Mauerwerk übliche, oktametrische Maßsystem zugrunde gelegt werden.³⁰ Gemäß *Lehmbau Regeln* beträgt die Mindestwanddicke tragender Stampflehmwände 32,5 cm (nichttragender Wände

²⁹ siehe DIN EN 1996-2 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk
³⁰ siehe DIN 4172: Maßordnung im Hochbau

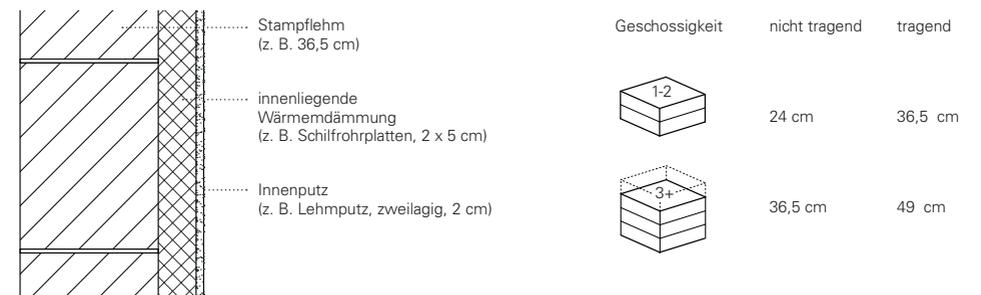


Abb. 3-16: angenommener Standard-Wandaufbau (M. 1:20)

Tab. 3-1: angenommene Mindestwanddicken für Außenwände aus Stampflehm-Mauerwerk

20 cm).³¹ Da bei Mauerwerk, aufgrund der Fugen, von einer etwas geringeren Festigkeit als bei monolithischer Bauweise ausgegangen werden muss, wären somit Mindestwanddicken von 36,5 cm (tragende Außenwände) bzw. 24 cm (nichttragende Außenwände) ansetzbar. Mit diesen wären in der Regel ein- bis zweigeschossige Außenwände zu realisieren, mit 49 cm (tragend) bzw. 36,5 cm (nichttragend) ggf. auch mehr als zweigeschossige Wände (Tab. 3-1, vorherige Seite).³²

31 vgl. Dachverband Lehm e. V. 2009, S. 50, S. 61

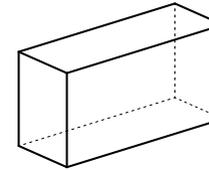
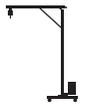
32 Zu beachten ist auch, dass diese Anhaltswerte für Wandstärken hohe Sicherheitsbeiwerte beinhalten, und im Zuge einer steigenden Qualitätssicherung des Baustoffs verringert werden könnten.



11⁵ x 11⁵ x 24 cm
min. 6 kg
(2DF)



24 x 24 x 36⁵ cm
min. 38 kg
(12DF)



99 x 49 x 36⁵ cm
min. 317 kg



Abb. 3-17: wichtigste Elementformate (am Beispiel der Wandstärke 36,5 cm) und Versatzmöglichkeiten

Schichthöhe	Bezeichnung	Abmessungen			Gewicht		Wandstärke
		H (cm)	B (cm)	T (cm)	min (kg)	max (kg)	
12,5	2DF	11,3	11,5	24	6	7	24
							24
							36,5
							49
	4DF	11,3	24	24	12	14	24
	6DF	11,3	24	36,5	18	22	36,5
25	8DF	11,3	24	49	24	29	24
	8DF	11,3	49	24	24	29	49
	8DF	23,8	24	24	25	30	24
	12DF	23,8	24	36,5	38	46	36,5
	16DF	23,8	24	49	50	62	49
	16DF	23,8	49	24	50	62	24
50		23,8	49	36,5	77	94	36,5
		23,8	49	49	103	126	49
		23,8	99	49	208	254	49
		48,8	49	24	103	126	24
		48,8	49	36,5	157	192	36,5
		48,8	49	49	211	258	49
		48,8	99	24	209	255	24
		48,8	99	36,5	317	388	36,5
		48,8	99	49	426	521	49

Tab. 3-2: Mögliche Schichthöhen und Steinformate

Als Schichthöhen für Stampflehm-Mauerwerk kommen vor allem 12,5 cm, 25 cm, sowie 50 cm in Betracht. Grundsätzlich eignet sich Stampflehm umso besser, je größer das Steinformat ist, da aufgrund der grobkörnigen Zuschläge ein hoher Kantenanteil von Nachteil ist. Daher sollten sehr kleine Formate vermieden werden. Schichthöhen über 50 cm dagegen führen zu Elementformaten, welche weitaus weniger flexibel anwendbar, und aufgrund ihres hohen Gewichts nur mit schwerem Hebegerät zu versetzen sind.

Formate der Schichthöhe 12,5 cm eignen sich primär für den Eigenbau sowie das Bauen im Bestand. Unter den Steinformaten dieser Schichthöhe ist das Format 2DF (11,5 x 11,5 x 24 cm) hervorzuheben, da es sehr flexibel einsetzbar ist (alle Wandstärken sind in Verbandsmauerwerk herstellbar), und mit einem Gewicht von etwa 6 kg noch als Einhandstein gilt, welcher per Hand vermauert werden darf.³³

Unter der nächstgrößeren Schichthöhe von 25 cm sind vor allem drei Steinformate geeignet. Unter diesen bildet das Format 24 x 24 x 24 cm einen Sonderfall, da es noch per Hand, mithilfe von

33 vgl. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Fachausschuss "Bau" 1992

Greifwerkzeugen, versetzbar ist. Alle weiteren Formate müssen per Hebegerät versetzt werden.

Die Schichthöhe 50 cm hingegen zeigt das größte Anwendungspotential, da mithilfe von Elementen dieser Größenordnung Wände besonders effizient erstellt werden können. Auch hier bieten sich vor allem drei Formate an.

Tab. 3-2, S. 50 zeigt eine Übersicht der möglichen Schichthöhen und Steinformate, mit Hervorhebung der wichtigsten Formate. Die Gewichtsangaben beziehen sich auf Trocken-Rohdichten von 1800 kg/m² (min.) und 2200 kg/m² (max.).

Da bei Sichtmauerwerk der Planung des Fugenbildes eine wichtige gestalterische Bedeutung zukommt, sollten Schichtmaß und Steinformat bereits früh im Entwurfsprozess mitbedacht werden. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei sämtlichen Sonderstellen im Gefüge, also den Gebäudeecken, Wandöffnungen, Dachrändern etc. zu schenken. Im Falle von Einsteinmauerwerk (Wandstärke = Steintiefe) ist das Steinformat vor allem auch unter Berücksichtigung des Eckverbundes zu wählen.

Als Fugenstärke der horizontalen Lagerfugen bietet sich bei allen Schichthöhen, analog zum klassischen Mauerwerksbau und zu Lehmsteinmauerwerk gemäß DIN 18945, zunächst 12 mm an.³⁴ Bezüglich der Stoßfugenbreite soll von 10 mm ausgegangen werden.

Als Mauermörtel eignet sich grundsätzlich am meisten ein reiner Lehmörtel. Dies merkte bereits Cointereaux für den Nouveau Pisé an, und ist auch die heute gängige Praxis bei der Fügung von Stampflehm-Großblöcken.³⁵ Ebenso wird im heute üblichen Lehmsteinbau (kleinformatige, industriell hergestellte Lehmsteine) in aller Regel Lehmmauermörtel verwendet.³⁶ Kalkmörtel oder durch Kalk stabilisierte Lehmörtel sind weder Gegenstand der DIN 18946 (geltend für im Werk hergestellte Lehmmauermörtel), noch der Lehmbau Regeln (geltend für auf der Baustelle hergestellter Mauermörtel) Allgemeine Maßgaben zur Anwendung von Lehmmauermörtel finden sich in den Lehmbau Regeln.³⁷

Da bei Stampflehm-Mauerwerk, insbesondere den Schichthöhen 25 cm und 50 cm, deutlich größere Steingewichte auftreten, ist zu vermuten, dass im Gegensatz zu eher feinkörnigem Lehm-

mauermörtel gemäß DIN 18946 bzw. Lehmbau Regeln ein Anteil kleinerer Kieskörnungen (max. ca. 8 mm Körnungsgröße) im Mörtel vorteilhaft ist, um zu verhindern, dass dieser durch das Eigengewicht der Steine aus den Fugen gedrückt wird. Auch die Konsistenz des Mörtels lässt sich hierhingehend optimieren.

3.2.2.2 Technische Rahmenbedingungen

Was die Produktionsmöglichkeiten für Stampflehm-Steine angeht, so ist maschinelle Fertigungstechnik, welche speziell auf kleinere Elemente zugeschnitten ist, aktuell noch nicht verfügbar. Eine theoretische Möglichkeit, solche Elemente heute seriell herzustellen, ist das Stampfen in größeren Abschnitten (ähnlich wie bei der Vorfertigung von Großblöcken), und das anschließende Zerteilen in kleinere Einheiten. Während das Stampfen hier relativ effizient zu leisten ist, kann das Zerteilen durch Trennschleifer aufgrund des hohen Zerteilungsgrades jedoch einen hohen Arbeits- und Zeitaufwand bedeuten.

Darüber hinaus ist ebenso das händische, bzw. handgeführte maschinelle Stampfen in Einzelformen möglich. Hier ist jedoch der relativ hohe Zeitaufwand für das Auseinandernehmen der Schalung (Ausschalen), und das erneute Zusammenbauen zu beachten. Werden viele Elemente benötigt, so lassen sich Einzelschalungen zu größeren Schalungsverbänden kombinieren, sodass je Ausschal-Vorgang möglichst viele Elemente produziert werden können.

Für die weitere Entwicklung der Fertigungstechnik sind jedoch maschinelle, vollautomatisierte Prozesse denkbar, mittels derer große Stückzahlen von Elementen produzierbar wären, und Herstellungskosten deutlich gesenkt werden könnten. Für die Herstellung gepresster Lehmsteine (auch *Compressed Earth Blocks* oder *CEB*) gibt es seit einiger Zeit bereits größere, automatisierte Pressen. Gepresste Lehmsteine weisen jedoch eine andere materielle Zusammensetzung auf, welche keine Großkörner wie Stampflehm beinhaltet. Die charakteristische Sieblinie des Stampflehms, vor allem die Grobkörner in der Mischung, machen es jedoch notwendig, dass neben dem Kompressionsdruck auch ein Anteil an Vibration beim Verdichten der Mischung vorhanden ist.³⁸ Houben und Guillaud nennen diese Art der Verdichtung *dynamische Komprimierung durch*

34 Auch für die Fügung von Großblöcken verwendet Rauch ein Mörtelbett von etwa 1 cm Stärke. (vgl. Rauch 2015, S. 120)

35 vgl. Rauch 2015, S. 120.

36 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 166.

37 vgl. Dachverband Lehm e.V. 2009, S. 41 ff.

38 vgl. Minke 1986, S. 11, sowie Dahmen, Muñoz 2015, S. 81.

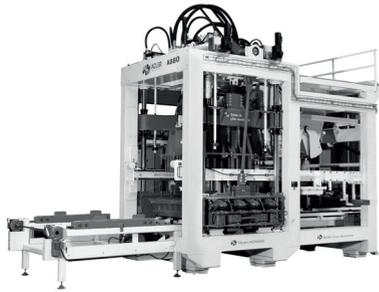


Abb. 3-18: Betonsteinpresse (Fa. Adler Technologies)

Vibration (in Gegenüberstellung zu *statischer Komprimierung*).³⁹ Diese ist beim händischen Stampfen oder dem Einsatz pneumatischer/elektrischer Stampfer durch das häufige Auftreffen des Stampfers auf den Lehm, bzw. das Stampfen in kleinen Schritten, gegeben. Auch Schaffußwalzen oder Vibrationsplatten, welche im Straßenbau eingesetzt werden, komprimieren dynamisch.

Eine vielversprechende Möglichkeit stellen daher sogenannte Rüttelpressen dar, welche in der industriellen Betonsteinherstellung eingesetzt werden (Abb. 3-18). Für die Herstellung von Betonwerksteinen wird haufwerksporiger Beton verwendet, welcher eine ähnliche Sieblinie und Konsistenz wie Stampflehm aufweist, und auf ähnliche Weise verdichtet wird. Mittels dieser Technik wäre die industrielle Herstellung kleiner Stampflehm-Steinformaten bereits heute möglich. Laut Houben und Guillaud kann diese Art von Pressen, aufgrund der Kombination von Kompression und Vibration, mit relativ geringen Kompressionsdrücken arbeiten.⁴⁰ Die US-amerikanische Firma Watershed Materials verwendet seit neuestem ähnliche Pressen zur Herstellung ihrer durch Zement stabilisierten Lehmsteine.⁴¹

Für die Herstellung größerer Elemente mit einer Höhe von 24 oder 49 cm müsste eine mehrlagige Verdichtung ermöglicht werden. Die Entwicklung derartiger Maschinen dürfte jedoch technisch kein Problem darstellen, sondern eher von ökonomischen Aspekten abhängen.

Die Verwendung von Rüttelpressen würde auch die Fertigung nahe der Baustelle fördern. Bei kleineren Baustellen etwa

39 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 175.

40 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 237. Die Autoren berichten hier, dass derartige Pressen bereits für den Lehmabbau adaptiert wurden, und zur Produktion von herkömmlichen Steinen des Formats 20 x 20 x 50 cm zum Einsatz kamen.

41 vgl. Dahmen, Muñoz 2015, S. 81. Siehe hierzu auch: <https://watershedmaterials.com/>

könnten sehr einfach mobile Pressen zum Einsatz kommen. In Fällen, in denen die Gewinnung des Lehms vor Ort erfolgt, könnten hierdurch Transportwege minimiert, und die Umweltbilanz des Baustoffs weiter optimiert werden.

Was den Bauprozess angeht, so ist vor allem der Aspekt der Handhabung der Elemente von Bedeutung. Gemäß *Merkblatt für das Handhaben von Mauersteinen* der Berufsgenossenschaft Bau⁴² sind alle Mauersteine über 25 kg per Hebegerät zu versetzen. Als Hebezeuge kommen vor allem Versetzgeräte (auch Minikran oder Mauerkran genannt) in Betracht, welche üblicherweise für die Vermauerung von Großformat-Plansteinen aus Kalksandstein oder Porenbeton verwendet werden (Abb. 3-19). Diese können in der Regel Elemente mit einem Gewicht von bis zu 400 oder 500 kg bewegen und ermöglichen gerade bei größeren Elementformaten einen zügigen Bauablauf.

Zur Halterung der Lehmelemente kommen z. B. Greifzangen (Abb. 3-20) infrage, die jedoch, anders als bei KS oder Porenbeton, von außen an die Elemente angesetzt werden müssten, da die Halterung über in den Stein integrierte Haltelöcher wenig praktikabel erscheint.

Alternativ kann auch schweres Hebegerät wie z. B. Gabelstapler verwendet werden.

42 vgl. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Fachausschuss "Bau" 1992



Abb. 3-19: Minikran



Abb. 3-20: Greifzange, Fa. Probst

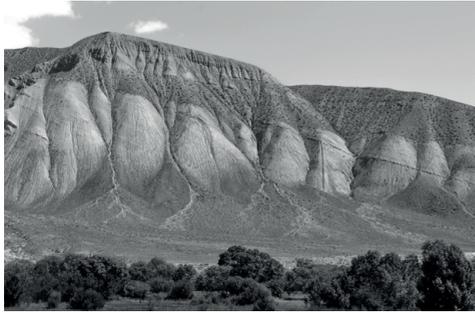


Abb. 3-21: Durch Erosion geformter Berghang

3.3 Stampflehm und Erosion

In diesem Abschnitt soll das Thema der Erosion bei Stampflehm, im Speziellen das Prinzip der *Kalkulierten Erosion*, näher betrachtet werden.

Erosion bezeichnet allgemein den Prozess des Abtransports verwitterten Materials durch Wind, Wasser, Eis oder Schwerkraft.⁴³ Erosion steht damit in engem Zusammenhang mit Verwitterungsprozessen, welche etwa bei Gestein über sehr lange Zeiträume ablaufen. Verwitterung entsteht durch physikalische (z. B. Frostverwitterung) als auch chemische Prozesse. Lehm selbst ist ein Produkt der Erosion. Seine Bestandteile sind unterschiedlich große, d. h. in der Regel unterschiedlich lange verwitterte Zersetzungsprodukte von Felsgestein. Das Tonmineral ist hierbei die kleinste Einheit, in die die Natur Gestein aufspaltet.

In der Architektur betrifft Erosion hauptsächlich die Gebäudehülle, d. h. Fassade und Dach. Zu den Auslösern bzw. Einflussfaktoren zählen hier im Wesentlichen Regen, Wind und Frost, aber auch Schallwellen, Bewegungen des Bauwerks, oder Bewegungen infolge von Quell- und Schwindprozessen. Dabei unterliegen grundsätzlich alle Materialien der Erosion. Bei nicht behandelten Holzfassaden etwa treten oft deutlich wahrnehmbare Verwitterungserscheinungen

auf. Auch bei mineralischen Werkstoffen wie Naturstein oder gebrannten Ziegeln (Klinkern) kommt es häufig zur Erosion der Oberfläche. Der Hauptgrund ist hierbei meist in die Poren eingedrungenes Wasser, welches bei Frost zu Abplatzungen führt.⁴⁴

Der Baustoff Lehm ist aufgrund seiner Wasserlöslichkeit besonders stark von Erosion betroffen. Anders als bei anderen Baustoffen kann Erosion für Lehmbauten eine direkte Bedrohung der Dauerhaftigkeit darstellen. Unterscheiden lässt sich hierbei zwischen den Betrachtungsebenen der Tragwerksicherheit und der Oberflächenqualität.

3.3.1 Einflussfaktor Schlagregen

Den maßgeblichen Einflussfaktor bei der Erosion von Lehm-Außenwänden stellt Schlagregen dar. Die Schlagregen-Belastung einer Fassade ist zunächst abhängig von den am Standort allgemein anfallenden Regenmengen. In der DIN 1986-100 (*Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke*) werden die in Deutschland auftretenden Mengen für knapp 100 Standorte aufgeführt. Die DIN 1986-100 unterscheidet dabei zwischen verschiedenen Angaben bezogen auf Dauer und Jährlichkeit von Starkregeneignissen, so z. B. der Regenspende $r_{(5,5)}$ oder der Regenspende $r_{(5,100)}$. Diese geben Regenmengen an, die binnen 5 min. anfallen und je Standort im Schnitt nur einmal alle fünf bzw. 100 Jahre überschritten werden.⁴⁵ Der Mittelwert für $r_{(5,5)}$ beträgt z. B. 312 l / s · ha.⁴⁶

Auch was speziell Schlagregen angeht, kann die Belastung von Standort zu Standort unterschiedlich hoch ausfallen. Eine grobe Orientierung ermöglicht hier die DIN 4108-3, welche für Deutschland zwischen drei Beanspruchungsgruppen unterscheidet (Abb. 3-22, nächste Seite).⁴⁷ Diese einfache Klassifizierung ist jedoch für eine genauere Beschreibung der lokalen Beanspruchungssituation nicht geeignet. Vielmehr kommt es hierfür auf standortspezifische Faktoren wie Topografie, Bebauung in der Umgebung, oder Oberflächenbeschaffenheit an.⁴⁸ Berücksichtigt werden diese Faktoren in der DIN EN ISO 15927-3, welche ein detailliertes Berechnungsver-

43 Der Begriff geht zurück auf das lateinische Wort „erodere“ (übers. „abnagen“), vgl. Richter 1980

44 vgl. Weidinger 2003

45 vgl. DIN 2008, S. 56

46 vgl. DIN 2008, Tab. A.1, S. 82 ff.

47 Die Beanspruchungsgruppen entsprechen Jahresniederschlagsmengen von unter 600 mm bis über 800 mm.

48 vgl. Künzel 1994, S. 1.

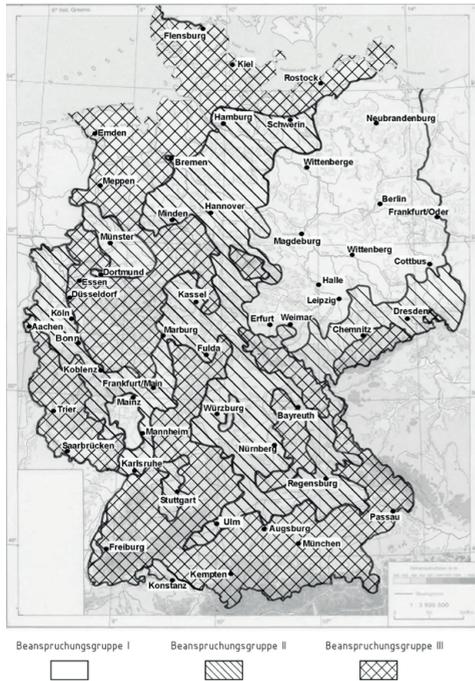


Abb. 3-22: Schlagregen-Beanspruchungsgruppen nach DIN 4108-3

fahren für die örtliche Schlagregenbelastung anbietet. Gemäß dieser ist davon auszugehen, dass sich allein das Vorhandensein von Hindernissen (Gebäuden, Vegetation, etc.) in der näheren Umgebung mit dem Faktor 5 auf die Regenmenge auswirkt, und somit eine erhebliche Einflussgröße darstellt.⁴⁹ Ebenso werden hier Aussagen über die Verteilung der Schlagregenmenge auf einzelne Fassadenbereiche gemacht. So unterscheiden sich bei einer zweigeschossigen Giebelwand die auftreffende Regenmenge im Sockel- und Firstbereich um das 2,5-fache (Abb. 3-23).

Messungen an einer Hochhausfassade (Abb. 3-25) ergaben zudem, dass die Beanspruchung je nach Fassadenbereich sogar um den Faktor vier variieren kann. Ebenso sind Fälle bekannt, bei denen

49 vgl. DIN 2009, S. 13

die Unterschiede noch weit mehr betragen.⁵⁰

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor für die Schlagregenmenge ist die Orientierung der Fassadenfläche. Während sich die Berechnungen der DIN EN ISO 15927-3 auf die der vorherrschenden Windrichtung zugewandte Fassadenseite⁵¹ (Wetterseite) beziehen, machen die Belastungen der Nichtwetterseiten laut einer Studie des Fraunhofer Instituts für Bauphysik im Vergleich lediglich 2 bis 8% aus.⁵²

In Anbetracht dieser Faktoren wird deutlich, dass die reale Schlagregenbeanspruchung je nach lokalen Standortbedingungen stark variieren kann.

Um den Einfluss zu veranschaulichen, den unterschiedlich starke Schlagregenexpositionen auf das Maß der Erosion haben können, sollen zwei gebaute Objekte dienen. Sowohl bei der Totenkapelle und Friedhofserweiterung in Batschuns, Österreich (Architekten: Marte.Marte, 2001), als auch der Produktions- und Lagerhalle für Ricola in Laufen, Schweiz (Architekten: Herzog & de Meuron, 2013, vgl. S. 37), sind die Außenwände aus Stampflehm frei bewittert. Bei einer Besichtigung im September 2015 zeigte sich bei beiden Gebäuden eine wesentlich stärkere Erosion an der Wetterseite (Nordseite in Batschuns, Süd-West-Seite in Laufen) als an den wetterabgewandten Gebäudeseiten (Abb. 3-25, Abb. 3-27, folgende Seiten). Diese betrug in Teilbereichen mehrere cm. Beim Projekt in Laufen ließ sich zudem feststellen, dass die Erosion mit der Höhe der

50 vgl. Künzel 1994, S. 2

51 In Mitteleuropa ist die in aller Regel die SW- bis Westfassade.

52 vgl. Künzel 1994, S. 2

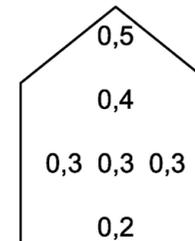


Abb. 3-23: Schlagregenverteilung auf einer zweigeschossigen Giebelwand

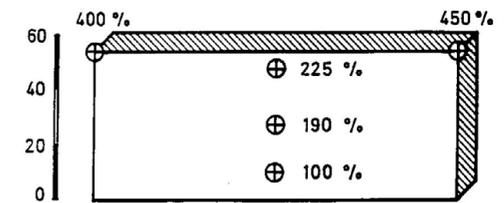


Abb. 3-24: Schlagregenverteilung auf einer Hochhausfassade

Fassade zunimmt. Die größten Auswaschungen waren im oberen Wandbereich erkennbar, direkt unterhalb des durch die Vorkragung des Dachs geschützten Bereichs (Abb. 3-28). Angesichts des Altersunterschiedes der Gebäude mag auf den ersten Blick überraschen, dass hier insgesamt ein mit dem Objekt in Batschuns vergleichbares Maß der Erosion beobachtet werden konnte. Abgesehen von den konkreten Schlagregenbelastungen der jeweiligen Standorte liegen



Abb. 3-25: Kapelle Friedhof Batschuns (Ansicht von Nord-West)



Abb. 3-26: Erosion an der Nordfassade, Kapelle Friedhof Batschuns

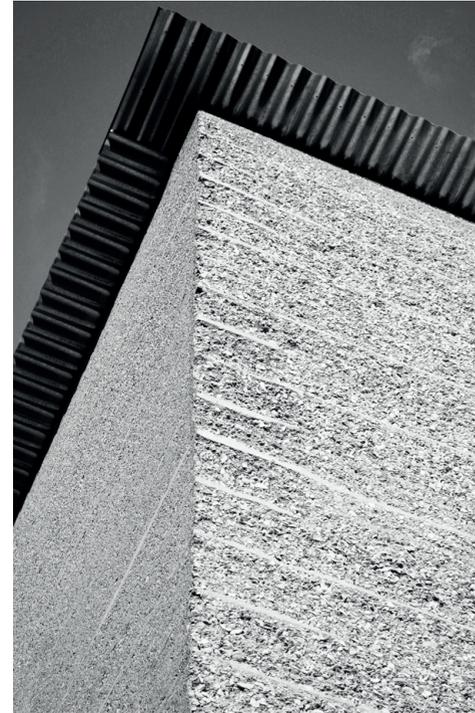


Abb. 3-27: Erosion an der Gebäudeecke, Ricola Kräuterzentrum



Abb. 3-28: Erosion Südwest-Fassade, Ricola Kräuterzentrum

die Gründe hierfür vermutlich in der unterschiedlichen Fassadenhöhe (s. o.), sowie der Tatsache, dass sich der Erosionsprozess nach einigen Jahren deutlich verlangsamt.

Über die auf die Fassade auftreffende Niederschlagsmenge hinaus spielen bei der Schlagregenerosion jedoch zahlreiche weitere Einflussparameter eine Rolle.⁵³ Am Fraunhofer Institut für Bauphysik etwa wurde im Rahmen von Untersuchungen festgestellt, dass sich bei porösen Oberflächen auch die Dauer des Niederschlags stark auswirkt, sodass bei einer schwachen, dafür aber lang andauernden Belastung eine höhere Wasseraufnahme und damit potentiell höhe-

53 vgl. Maniatidis, Walker, 2003, S. 17

re Erosion droht als bei einer starken, jedoch kurzen Belastung.⁵⁴ Dementsprechend weisen auch Walker et al. darauf hin, dass die Erosion von Lehmwänden umso stärker ausfällt, je höher der momentane Durchfeuchtungsgrad ist.⁵⁵ Bei Lehm wirken sich theoretisch zudem weitere Faktoren – wie etwa die Aufprallenergie bzw. Größe der Regentropfen, oder ihr Auftreffwinkel – aus, welche den Erosionsprozess hier besonders komplex machen.⁵⁶ Diese Faktoren sind bislang noch wenig erforscht.

Einen weiteren Faktor im Erosionsprozess bilden Frost–Tau–Wechsel. Allerdings ist bislang nicht hinreichend geklärt, ob diese eine bestimmende Größe darstellen. Während Ziegert und Röhlen vor Erosion durch Frosteinwirkung warnen⁵⁷, sehen andere, aufgrund des in aller Regel geringen Feuchtegehaltes von Stampflehm, in Frost keine Gefahr.⁵⁸ Der Einfluss von Frost wird hier im Weiteren ausgeklammert, da dessen Berücksichtigung den Rahmen der Arbeit sprengen würde, als auch eine Prognose des Einflusses auf die Bauteilgestalt unmöglich erscheint.

3.3.2 Arten des Erosionsschutzes

Um Schlagregen-Erosion auf der Wandoberfläche so weit wie möglich zu verhindern, können unterschiedliche Arten des Schutzes zur Anwendung kommen.

Konstruktiver Schutz

Die vielleicht grundlegendste Art ist der konstruktive Schutz. Ein typisches Beispiel ist hier das auskragende Dach, welches die darunter liegende Wand vor Schlagregen schützt. Traditionell wurden Stampflehmaußenwände oft durch große Dachüberstände geschützt, wie etwa im französischen Pisé-Bau. Die Bedeutung des Dachüberstandes (im Zusammenspiel mit einem wasserfesten Sockel, s.o.) spiegelt sich in der Redewendung vom „guten Stiefel und

guten Hut“, den ein Lehmbau benötigt.⁵⁹ Auch im Holzbau kommt dieser Art des Wetterschutzes eine große Bedeutung zu. Aus dem Holzbau stammt zudem die 60° - Regel, nach der sich das für den Schutz der Wand erforderliche Maß des Dachüberstandes ermitteln lässt.⁶⁰

Beschichtung

Auch ist es möglich, Regenwasser durch Beschichtungen der Lehmoberfläche von dieser fernzuhalten. Eine übliche Praxis, welche z. B. bei den Stampflehmgebäuden in Weilburg an der Lahn angewandt wurde, ist das Aufbringen eines Kalkputzes. In vielen südlichen Erdregionen, wie etwa in Afrika, sind auch Außenputze aus Lehm üblich, welche jedoch regelmäßig erneuert werden müssen.

Eine weitere Art der Beschichtung stellen Hydrophobierungen dar, welche die Lehmoberfläche imprägnieren, aber weitestgehend sichtbar belassen. Ein Beispiel für eine Hydrophobierung von Stampflehm ist der Anstrich mit Wasserglas. Hydrophobierungen schließen die Poren der Oberfläche zu einem gewissen Grad, und gehen dadurch meist einher mit einer Verringerung der Sorptionsfähigkeit des Bauteils. Auch wird bereits durch leichte Beschädigungen der Oberfläche die Schutzwirkung stark beeinträchtigt. Zudem verfälschen einige Hydrophobierungen die natürliche Wirkung der Lehmoberfläche.

Walker et al. weisen zudem darauf hin, dass Putze und Hydrophobierungen keinesfalls als Allheilmittel gegen Erosion zu sehen sind, da zum Teil wenig Erfahrung im Umgang mit diesen besteht, als auch meist regelmäßige Wartung bzw. Pflege erforderlich ist.⁶¹

Stabilisierung

Weiterhin lässt sich Stampflehm durch die Beigabe organischer oder chemisch wirksamer Bestandteile wasserbeständiger machen.

Bereits erwähnt wurde die Stabilisierung durch Kalk und Zement (vgl. S. 43). Vor allem in den USA und Australien ist der

54 vgl. Künzel 1994, S. 1. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei Schlagregen ein nahezu proportionaler Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Regenmenge besteht.

55 vgl. Walker et al. 2005, S. 85

56 vgl. Heathcote 2002, S. 82

57 vgl. Ziegert, Röhlen 2014, S. 180

58 vgl. z. B. Walker et al. 2005, S. 42, S. 88; Thomson, Pope, Walker 2008; Keefe 2005, S. 150

59 vgl. z. B. Houben, Guillaud 1994, S. 246

60 vgl. DIN 2012, S. 12. Nach Walker et al. ist für einen vollständigen Schutz (auch bei sehr starker Exposition) ein Überstand von bis zu einem Drittel der Wandhöhe ausreichend. Dies entspricht in etwa einem Winkel von 70° zur Horizontalen, also einem geringeren Überstandsmaß als nach DIN 69900-2. (Vgl. Walker et al. 2005, S. 69)

61 vgl. Walker et al. 2005, S. 70

Verwendung von Zement heute sehr verbreitet. Zwar lassen sich die Festigkeitswerte des Lehms hierdurch deutlich steigern, jedoch ist der benötigte Zementanteil vergleichbar mit dem von Beton bzw. Betonsteinen. Darüber hinaus werden viele positive Eigenschaften des Lehms – wie z. B. die Regulation der Raumluftfeuchte und die Rezyklierbarkeit – stark beeinträchtigt.

Auch ist es möglich, die Wetterfestigkeit von Lehmbaustoffen mittels tierischer, pflanzlicher, oder auch synthetischer Produkte zu erhöhen. Ausführliche Hinweise hierzu finden sich z. B. bei Houben und Guillaud⁶² oder Minke⁶³. Neuere Forschungen betreffen zudem Stabilisierungen auf Silikonbasis⁶⁴, durch Eingriffe auf molekularer Ebene⁶⁵, als auch durch chemische Aktivierungsprozesse (*Geopolimerisation*).⁶⁶

3.3.3 Frei bewitterte Anwendung

Aus verschiedenen Gründen, etwa um den Einsatz von Zement oder Kalk zu vermeiden, oder auch aus rein gestalterischen Motiven, kann die Verwendung beschriebener Arten des Erosionsschutzes jedoch unerwünscht, und eine frei bewitterte Anwendung von Stampflehm gewünscht sein. Jedoch ist diese noch wenig erforscht. Gerade in Bezug auf die klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa liegen bislang keine allgemein anerkannten Anwendungsregeln vor.

Der Blick auf das bauliche Erbe in Stampflehm lässt eine Eignung zunächst stark vermuten. Unzählige historische Beispiele, bei denen ungeschützte Stampflehmoberflächen Jahrhunderte schadlos überstanden haben, geben Zeugnis von der Erosionsbeständigkeit des Baustoffs ab. Zu nennen sind hier vor allem die *Pisé*-Bauten im französischen Rhône-Alpes (vgl. S. 36).⁶⁷ Auch z. B. Teile des Horyuji-Tempels in Japan, welcher um etwa 1300 Jahre zurückdatiert, sind in reinem Stampflehm ausgeführt worden, und noch heute in einwandfreiem Zustand.⁶⁸ Angesichts dieser augenscheinlichen Dau-

erhaftigkeit von Stampflehm argumentieren Houben und Guillaud, dass in gemäßigttem Klima, wie in Mitteleuropa, Wände bei guter Materialqualität – und sofern Sockel und Mauerkrone geschützt sind (vgl. S. 38) – ungeschützt belassen werden können. Sie vertreten, dass jede Lehmwand imstande sein sollte, direktem Wassereinfluss standzuhalten⁶⁹, und beklagen einen oft unbedachten, zu pauschalen Einsatz von Stabilisierung (mittels Zement oder Kalk), welcher ihrer Ansicht nach auf fehlende Kenntnis, oder auch fehlende Wertschätzung, der besonderen Charakteristika des Baustoffs zurückzuführen ist.⁷⁰ Allerdings betonen Houben und Guillaud, dass sich eine freie Bewitterung nicht an jedem Ort und bei jeder Fassadenausrichtung eignet, also auf die genauen Standortbedingungen zu achten ist.⁷¹ Auch Walker et al. halten den frei bewitterten Einsatz grundsätzlich für möglich, sehen es jedoch als essentiell an, die genaue Materialzusammensetzung zuvor unter Langzeitbedingungen zu erproben.⁷² Röhlen und Ziegert hingegen raten von einer freien Bewitterung ab.⁷³ Sie verweisen auf die Lehm-Bau-Regeln, nach denen direkt bewitterte Stampflehmfassaden in Deutschland nicht zulässig sind. Dies bedeutet, dass hierfür bislang eine Zustimmung im Einzelfall einzuholen ist (vgl. S. 38).⁷⁴ An Nicht-Wetterseiten halten sie einen ungeschützten Einsatz grundsätzlich für möglich.⁷⁵

3.3.3.1 Erkenntnisse aus der Forschung

Wie u. a. von Hall und Djerbib beschrieben, absorbiert eine Lehmoberfläche die bei leichtem, kurzem Regen anfallende Feuchtigkeit problemlos, und gibt sie anschließend wieder zügig ab.⁷⁶ Bei stärkerem Regen – oder falls die Lehmoberfläche bereits saturiert ist – funktioniert diese Feuchtigkeitsaufnahme jedoch nicht länger, und das Wasser rinnt die Fassade hinab.⁷⁷ Die Feinanteile auf der Oberfläche werden hierdurch vor allem im Laufe des ersten Jahres

62 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 73–102.

63 vgl. Minke 2001, S. 80 ff.

64 vgl. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 117

65 vgl. Fontaine et al. 2008, S. 198

66 vgl. Dahmen, Muñoz 2015, S. 82

67 vgl. z. B. CRAterre 2004

68 vgl. Hall, M.; Djerbib, Y. – Rammed earth sample production: Context, re-recommendations and consistency. *Construction and Building Materials* 18(2004), 2004, S. 281–286, zitiert in: Bui 2008, S. 54

69 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 332

70 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 73: „It is particularly unfortunate that many practitioners of systematic stabilization do not know, or do not appreciate, the original characteristics of a soil, and start about stabilizing soil with undue haste when it is not particularly useful.“

71 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 332

72 vgl. Walker et al. 2005, S. 42

73 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 187

74 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 180. Die Autoren führen hier die Gefährdung durch Frost an.

75 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 188

76 vgl. Hall, M.; Djerbib, Y. – Moisture Ingress in Rammed Earth: Part 3: Sorptivity, Surface Receptiveness and Surface Inflow Velocity, 2006, zitiert in: Jaquin 2008, S. 275

77 vgl. Jaquin 2008, S. 275



Abb. 3-29:
Versuchsstand von Minke,
Universität Kassel, 1984



Abb. 3-30:
Beispiel eines Spray-Tests



Abb. 3-31:
Testwand unter natürlichen
Bedingungen, Bui et al.

ausgewaschen, und die Oberfläche wird mit der Zeit rauer.⁷⁸

Um diesen Prozess näher zu untersuchen, entwickelte Minke in den 1980er Jahren, am Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) der Universität Kassel, verschiedene Versuchsstände, mittels derer er kleinere Probekörper künstlich berechnete (Abb. 3-29). Minke fand dabei heraus, dass die Zusammensetzung der Lehmischung eine große Rolle für die Erosionsbeständigkeit spielt.⁷⁹ In der Folge wurden diverse weitere Labortests entwickelt, so z. B. der von Heathcote beschriebene Spray-Test, bei dem eine Lehmprobe unter hohem Druck mit Wasser besprüht wird (Abb. 3-30).⁸⁰ Es zeigte sich jedoch, dass diese Testmethoden eher ungeeignet, weil zu unrealistisch sind.⁸¹ Ein Grund hierfür ist die Schwierigkeit der Abbildung des über einen langen Zeitraum ablaufenden, natürlichen Erosionsprozesses.⁸² Heathcote schlägt daher vor, Labortests durch parallele Untersuchungen unter natürlichen Bedingungen zu kalibrieren⁸³, was sich unter anderem in der neuseeländischen Lehmbaunorm niederschlug.⁸⁴

78 vgl. Walker et al. 2005, S. 85

79 vgl. Minke 2001, S. 79.

80 vgl. Heathcote 2002, S. 15 ff.

81 vgl. z. B. Bui et al. 2009, S. 912; Maniatidis, Walker 2003, S. 17; Houben, Guillaud 1994, S. 147

82 vgl. z. B. Walker et al. 2005, S. 88: „It is very difficult at present to predict the weathering of an untried rammed earth material. Performance depends on design and actual weathering over the life of the building, something increasingly difficult to predict [...]“

83 vgl. Heathcote 2002

84 vgl. Standards New Zealand: NZS 4297:1998 "Engineering Design of Earthbuildings", erwähnt in: Schröder 2019, S. 448

Bui et al. sowie Dahmen unternahmen zudem Feldversuche, welche längere Zeiträume betrachteten. Sie untersuchten eine Reihe von Testwänden, welche 20 Jahre dem Wetter in der Region Rhône-Alpes ausgesetzt wurden (Abb. 3-31). Durch die Untersuchungen konnte die Erosionsbeständigkeit verschiedener, nicht stabilisierter Stampflehm-Mischungen bestätigt werden.⁸⁵ Die ermittelte Erosionstiefe betrug hier auf der Wetterseite durchschnittlich etwa 6 mm.⁸⁶ Studien von Dahmen anhand einer Mauer in Boston (USA) bestätigten ebenfalls eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlagregen, bei ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich der Erosionstiefe.⁸⁷ In beiden Fällen sind die klimatischen Bedingungen, insbesondere die jährlichen Niederschlagsmengen, mit denen in Deutschland vergleichbar.⁸⁸

Zur Messung der Erosionstiefen verwenden die erwähnten Autoren unterschiedliche Methoden, welche jeweils eine Vielzahl von Messpunkten auf der betreffenden Oberfläche berücksichtigen.⁸⁹ Aus den Einzelwerten wird anschließend ein Mittelwert gebildet.

Die Bedeutung der Art der Zuschläge, als auch der Art und Menge der Tonminerale in der Mischung, betonen wie Minke auch Röhlen und Ziegert.⁹⁰ Der genaue Einfluss der unterschiedlichen Bestandteile auf die Erosionsbeständigkeit ist bislang kaum untersucht. Mehrere Autoren betonen jedoch den positiven Effekt relativ großer und vor allem scharfkantiger Grobkörner in der Mischung, welche stärker in der Wand verankert sind, und sich gut miteinander verzahnen.⁹¹ Während Röhlen und Ziegert fetten Mischungen eine höhere Erosionsbeständigkeit zuschreiben, wirkt sich nach Thomson ein hoher Tongehalt eher negativ aus.^{92, 93}

85 vgl. Bui et al. 2009.

86 Bui et al. gehen grundsätzlich von einer Nichtlinearität der Erosion aus, die am Anfang schneller fortschreitet, und mit der Zeit immer stärker abnimmt. (Vgl: Walker P. Keable R, Martin J, Maniatidis V., Rammed earth-design and construction guidelines, zitiert in: Bui et al. 2009, S. 919)

87 vgl. Dahmen 2015, S. 85 ff. Die ermittelte Erosionstiefe lag hier bei ca. 5-7 mm (nach neun Jahren Standdauer).

88 Die Jahresniederschlagsmenge betragen ca. 1000 mm/a (Rhône-Alpes) bzw. 1050 mm/a (Boston).

89 vgl. z. B. Bui et al. 2009, S. 916 sowie Thomson 2007, S. 17

90 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 180

91 vgl. z.B. Thomson et al. 2008; Kapfinger, Sauer 2015, S. 116; Röhlen, Ziegert 2014, S. 178; Hall, M.; Djerbib, Y. – Moisture Ingress in Rammed Earth: Part 2. The Effect of soil Particle-Size Distribution on the Absorption of Static Pressure-Driven Water. Construction and Building Materials 20, 2006, S. 374-383, zitiert in: Torgal, M. G. Eires, Jalali 2009, S. 98

92 vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 180

93 vgl. Thomson et al. 2008

3.3.3.2 Anhaltspunkte für die Anwendung

Diese Erkenntnisse bzw. Erfahrungswerte bieten einige Anhaltspunkte für den frei bewitterten Einsatz von Stampflehm.

Was die Standsicherheit einer Stampflehmwand angeht, so sehen etwa Bui et al. keine Gefährdung. Sie führen an, dass traditionelle Stampflehmwände in der Regel stark überdimensioniert wurden, und hierdurch Sicherheitsfaktoren zwischen 3 und 10 aufweisen. Diese Überdimensionierung mit der Schwächung des Wandquerschnitts durch Erosion verrechnend, argumentieren sie, dass selbst bei einer Erosionstiefe von 10% der Wandstärke (ca. 5 cm) noch immer ein Sicherheitsfaktor von min. 2,7 gegeben ist.⁹⁴ Selbst heute ist eine starke Überdimensionierung üblich. In Deutschland werden tragende Lehmwände gemäß Lehmbau Regeln mit einem globalen Sicherheitsbeiwert von etwa 7 bemessen, d. h. die zulässige Druckspannung wird auf lediglich ein Siebtel der im Kurzzeitversuch im Labor ermittelten Druckfestigkeit abgemindert. Aus diesem Grund stellt die direkte Bewitterung zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch für Schröder keine Gefährdung in statischer Hinsicht dar.⁹⁵

Im Zuge einer stärkeren Regelung und Normierung des Baustoffs, vor allem der Umstellung der Bemessungskonzepte auf die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten nach Eurocode, ist jedoch eine Verringerung der statisch notwendigen Querschnitte zu erwarten.⁹⁶ Erste Überlegungen zu solchen Bemessungen gehen etwa davon aus, dass sich der Sicherheitszuschlag, abhängig von der Erfahrung der ausführenden Firma, sowie Aspekten der Qualitätsprüfung, mehr als halbieren lässt.⁹⁷ Vorsicht ist ferner beim etwaigen Auftreten lokal begrenzter Auswaschungen wie z. B. Erosionsrinnen (z. B. aufgrund konstruktiver Mängel, vgl. Abb. 3-34, S. 74) geboten. Solche Auswaschungen, falls zügig entstehend bzw. fortschreitend, bedürfen in der Regel der Reparatur (s. u.).⁹⁸

Bezüglich des Aspekts der Oberflächenqualität erscheint nur eine grobe Annäherung an Anwendungsregeln möglich, da Versuche der Quantifizierung bislang kaum unternommen wurden. Bui

et al. definieren ein in ästhetischer Hinsicht akzeptables Maß der Erosion von 2,5 cm (5% der Wandstärke).⁹⁹ Sie lassen jedoch offen, auf welcher Grundlage dieses Maß definiert wurde. Gemäß der australischen Lehmbaunorm genügt eine Lehmwand den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, solange die mittlere Erosionstiefe nicht mehr als 5% der Wanddicke oder 3 cm beträgt.¹⁰⁰ Grundsätzlich bleibt festzustellen, dass die Definition einer solchen Schwelle auch der subjektiven Wahrnehmung unterliegt, und daher nicht ohne weiteres objektivierbar ist. Die von Bui et al. und der NZS angegebenen Maße entsprechen jedoch in etwa dem von Rauch beschriebenen Maß (siehe Abschnitt 3.3.4, S. 72 ff.), welches als eindeutig akzeptabel gelten dürfte. Was Erosionsrinnen o. ä. betrifft, so ist anzunehmen, dass dergleichen Veränderungen der Oberfläche auch in ästhetischer Hinsicht als Schadensfall wahrgenommen werden, und daher als nicht akzeptabel einzustufen sind.

Für die Beurteilung einer freien Bewitterung von Stampflehm ist jedoch zuallererst die Erwartungshaltung zu definieren, also grundlegend zu klären, welche Anforderungen an die Erosionsbeständigkeit gestellt werden. Dies hängt zunächst vom Grad der Akzeptanz der Erosion unter den Projektbeteiligten ab. Aber auch die Frage der Angemessenheit ist von Bedeutung, denn die vollständige Verhinderung von Erosion kann einen Aufwand erfordern, der in vielen Anwendungsfällen nicht gerechtfertigt ist. Das Maß an Risiko, welches eingegangen werden kann, ist dabei ein wichtiger Faktor. Heringer et al. schreiben: „*For practitioners of earth building, every project involves [...] calculated risk.*“¹⁰¹ Sie betonen jedoch, dass sich dieses Risiko beim Bauen mit Lehm stark abschwächen lässt, da Reparaturen sehr einfach möglich sind.¹⁰² Besonders an Stampflehmwänden sind viele Schäden leicht zu beheben.¹⁰³

Was kleinere Reparatur- bzw. Wartungsarbeiten angeht, so können auch Aspekte der persönlichen Identifikation mit dem Gebäude eine Rolle spielen. Zwar gilt, wie Houben und Guillaud anmerken, die Notwendigkeit einer regelmäßigen Wartung und Pflege von Bauten heute meist als nicht akzeptabel, da nur schwer mit unserer modernen Lebensweise vereinbar.¹⁰⁴ Im Zuge eines sich verändernden

94 vgl. Bui et al. 2009, S. 918.

95 vgl. Schröder 2019, S. 446.

96 vgl. Schröder 2019, S. 339 f.

97 vgl. Schröder 2019, S. 342

98 vgl. Walker et al. 2005, S. 94. Walker et al. stellen dabei heraus, dass langsame Veränderungen der Oberfläche keiner besonderen Gegenmaßnahmen bedürfen, und nur zügiger, lokal begrenzter Materialverlust Reparatur erfordert.

99 vgl. Bui et al. 2009, S. 919.

100 vgl. Standards New Zealand: NZS 4297:1998 "Engineering Design of Earthbuildings"; zitiert in: Heathcote 2002, S. 38 f.

101 Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 103

102 Ebd.: „*Because it can be retouched and repaired, it is actually possible to mitigate risk with earth.*“

103 vgl. z. B. Rauch 2011, S. 754

104 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 245

den Bewußtseins könnten jedoch sogar Instandhaltungsmaßnahmen in Eigenleistung wieder in Betracht kommen.

Grundsätzlich erscheint der frei bewitterte Einsatz von Stampflehm mit den Ansprüchen an Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit also durchaus vereinbar. Ein Blick auf andere Baustoffe bekräftigt diese Einschätzung. Im Vergleich mit industriell hergestellten Materialien stellen etwa Houben und Guillaud die besondere Langlebigkeit von Lehm heraus, welche grundsätzlich auch hinsichtlich seiner Erosionsbeständigkeit gelten kann. Sie erläutern, dass der Baustoff jedoch ein Problem hat, was den Nachweis seiner Leistungsfähigkeit angeht. Dadurch, dass Lehm viele Tests, welche ursprünglich für andere Materialien entwickelt wurden, nicht besteht, ist er, besonders in der heutigen Zeit, oft nicht auf den ersten Blick überzeugungsfähig. In der Praxis, bei korrekter Anwendung, zeigt sich Lehm jedoch als überaus dauerhaft. Demgegenüber erzielen moderne Baustoffe bessere Ergebnisse unter Laborbedingungen, schneiden jedoch in der konkreten Anwendung wesentlich schlechter ab als Lehm (Abb. 3-32).¹⁰⁵ Während historische Beispiele zeigen, dass Stampflehmfassaden Jahrhunderte schadensfrei überdauern

105 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 147

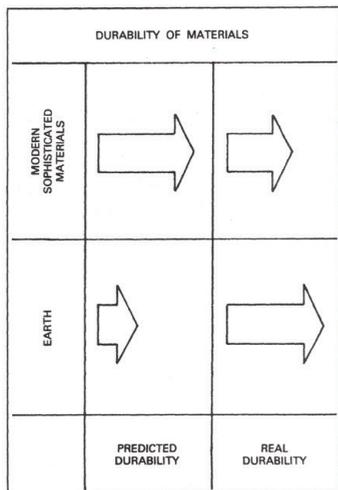


Abb. 3-32: Unterschiedliche Wahrnehmung der Haltbarkeit von Lehm- und industriell hergestellten Baustoffen.

können, liegt die durchschnittliche, technische Lebensdauer etwa von Stahl-Glas-Fassaden bei ca. 50 Jahren. Fassadenbekleidungen wie Aluminium-Verbund- oder Faserzementplatten weisen Haltbarkeiten von nur 40 bzw. 30 Jahren auf. Im selben Bereich liegen auch Putzoberflächen.¹⁰⁶ Die technische Lebensdauer gibt die Zeitspanne an, innerhalb derer Bauteile oder Bauteilschichten den an sie gestellten Anforderungen ohne Einschränkungen entsprechen, also nicht ersetzt werden müssen. Sie kann durch Pflege und Instandhaltung verlängert werden. Entscheidend für das Ende der technischen Lebensdauer kann Funktionsversagen, aber auch eine Beeinträchtigung der Oberflächenqualität sein. Letzterer Punkt ist jedoch wahrnehmungsabhängig, und kann von Material zu Material sehr unterschiedlich betrachtet werden.

Was ästhetische Fragen der Bewitterung von Stampflehm angeht, so zeigt sich zudem eine interessante Parallele zum Holzbau. In Österreich z. B. haben Architekten wie Hermann Kaufmann den ungeschützten Einsatz von Holz im Fassadenbereich aufbauend auf einer reichen lokalen Tradition kultiviert. Bei Holz bedeutet Erosion vor allem eine optische Veränderung der Oberfläche. Durch Einwirkung von Sonnenlicht und Regen verliert diese innerhalb einiger Jahre an Farbigkeit, und wird zunehmend dunkler. Während die theoretische, technische Lebensdauer von unbehandeltem Weichholz etwa 30 Jahre beträgt¹⁰⁷, kann sie in der Praxis um ein vielfaches höher ausfallen, wie zahlreiche Beispiele, etwa in Vorarlberg, belegen.

Kaufmann, der in der Vergangenheit eher negative Erfahrungen mit Holzschutzmitteln gemacht hat, argumentiert für einen rohen, ungeschützten Einsatz, für ein Zulassen der Verwitterung. Er schreibt: „*Holz ist ein Material, das sich gegen sämtliche Oberflächenbehandlungen wehrt, es wehrt sich einfach gegen den Schutz. Das Holz will atmen, es will Luft haben, es will altern.*“¹⁰⁸ Den Einfluss dieses Alterns auf die Fassadengestalt versucht Kaufmann im Vorhinein abzuschätzen, und bei der Planung zu berücksichtigen.¹⁰⁹ Zudem spricht er von Überzeugungsarbeit, die zu leisten ist, damit der Kreis an Personen, „[...] die das natürliche Holzaltern nicht nur akzeptieren, sondern auch als Qualität sehen [...]“, sich vergrößert.¹¹⁰

106 vgl. Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., 2008

107 Ebd.

108 Kapfinger 2001, S. 18

109 Ebd.: „Das kommt in unserem Büro auch immer mehr in das Planungsprozessdenken mit hinein. Wenn man Erfahrung hat, kann man vorrausschauend ziemlich genau sagen, wie ein bewitterter Holzteil in zehn Jahren ausschauen wird, je nach Höhenlage des Hauses, je nach Klimaverhältnis, nach Wetterlage [...]“ (Hermann Kaufmann)

110 vgl. Kapfinger 2001, S. 19

3.3.4 Kalkulierte Erosion

3.3.4.1 Kalkulierte Erosion nach Rauch

Martin Rauch hat den frei bewitterten Einsatz von Stampflehm im Zuge seiner jahrzehntelangen Bautätigkeit Schritt für Schritt weiterentwickelt, erprobt, und auf diese Weise im zeitgenössischen Kontext etabliert. Seine Haupt-Beweggründe sind die Vermeidung der Nachteile einer nicht reversiblen Stabilisierung des Baustoffs, die ermöglichte Freiheit im architektonischen Ausdruck (über einen großen Dachüberstand hinaus), sowie das explizite und unverfälschte Zeigen des Materials. Wie auch andere (s. o.) weist Rauch darauf hin, dass durch eine optimale Korngrößenverteilung in der Mischung, sowie eine sorgfältige Auswahl und Verarbeitung des Materials, die Erosionsbeständigkeit des Baustoffs wesentlich erhöht werden kann. Vor allem betont er die Bedeutung der Grobkörner in der Mischung, und sieht in diesen eine Art Selbstschutz des Materials begründet (Abb. 3-33).¹¹¹

Rauch's Umgang mit dem Baustoff stützt sich auf eine genaue Beobachtung des Erosionsprozesses. Dabei beschreibt er die Abläufe nicht auf einen isolierten Testkörper, sondern auf das Bauteil Wand als ganzem bezogen, und richtet seinen Blick vor allem auf den Einfluss des vertikal auf der Oberfläche ablaufenden Wassers. Hier differenziert er zwischen zwei Stufen der Erosion. Bis zu einer gewissen Regenmenge sorgt nach Rauch der genannte Selbstschutz dafür, dass die Erosion nach Auswaschung der Feianteile auf der Oberfläche kaum fortschreitet. Bei starkem, andauerndem Regen sieht er jedoch die Gefahr einer tiefschürfenden Erosion der Wand, da das Regenwasser aufgrund seiner hohen Ablaufgeschwindigkeit mehr Material mitreißt.¹¹² Diese Beobachtung deckt sich mit Erkenntnissen zu Erosionsprozessen in der Landschaft. Bei Flüssen oder auch an Hängen ablaufendem Wasser kommt es zu sogenannter *fluvialer Erosion*, bei welcher wiederum zwischen *laminarer* und

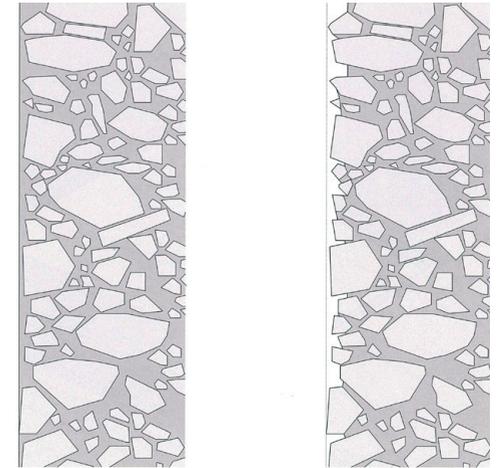


Abb. 3-33: Selbstschutz einer Stampflehmwand gegen Erosion (Schemazeichnung)

turbulenter Strömung unterschieden werden kann. Hohe Fließgeschwindigkeiten, welche mit großen Wassermengen einhergehen, begünstigen turbulente Strömungen, welche im Vergleich zu laminaren Strömungen wesentlich stärkere Erosion hervorrufen. Bei Flüssen kann turbulente Strömung, und die mit ihr verbundene *Schleppkraft*, zu einer erhöhten Mitnahme von Gestein im Flussbett führen, und dieses somit eintiefen.¹¹³

Erosionsbremsen

Für diesen Fall, in welchem der Selbstschutz des Materials nicht mehr ausreicht, bedient sich Rauch eines Hilfsmittels. Er integriert sogenannte *Erosionsbremsen* in die Wandoberfläche: dünne, horizontale Lagen aus Kalk oder Ziegelleisten in regelmäßigen Abständen, welche die Geschwindigkeit des vertikalen Wasserablaufs, und hierdurch den Anteil turbulenter Strömung, begrenzen. Zudem haben diese Barrieren eine weitere Funktion. Sie unterbinden die Vereinigung von Rinnsalen zu größeren „Bächen“, durch welche tiefere Furchen oder Erosionsrinnen (s. o.) in der Oberfläche entstehen

¹¹¹ vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 70: „Nach den ersten Jahren ist die obere, 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.“

¹¹² vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 70 sowie Rauch 2003, S. 651

¹¹³ vgl. Press 1995, S. 276

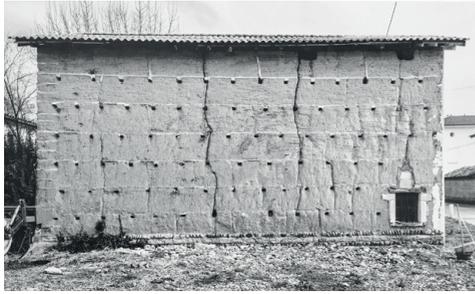


Abb. 3-34: Erosionsrinnen an einer historischen Stampflehmwand

können (Abb. 3-35).¹¹⁴ Die Erosionsbremsen können aus vorstehenden Ziegelleisten bestehen (vgl. Abb. 1-3, S. 17), alternativ auch aus oberflächenbündig in die Wand integrierten Lagen aus Trasskalkmörtel.¹¹⁵ Als vertikalen Abstand zwischen ihnen empfiehlt Rauch 40 – 60 cm.¹¹⁶ Abb. 3-36 veranschaulicht den Ablauf der fortschreitenden Erosion am Beispiel von Erosionsbremsen in Form eingestampfter Trasskalklagen. Insgesamt ist nach Rauch mit maximal etwa 2–3 cm Abtrag zu rechnen¹¹⁷, welcher durch entsprechende Überdimensionierung der Wand kompensierbar ist.¹¹⁸

Die Funktionsweise der Erosionsbremse wurde zwar bislang nicht systematisch erforscht, aber über Jahrzehnte anhand zahlreicher gebauter Objekte erprobt.¹¹⁹ Beim Projekt *Alnatura Campus* in Darmstadt (Fertigstellung 2017) wurde die Technik zum ersten Mal prominent in Deutschland angewandt.

Diesen Umgang mit der bewitterten Stampflehmoberfläche – die grundsätzliche Akzeptanz der Erosion, sowie deren Begrenzung durch das Element der Erosionsbremse – bezeichnet Rauch

als *kalkulierte Erosion*.¹²⁰ Er strebt keine Verhinderung, sondern nur eine Abschätzbarkeit der Erosion an. Der natürliche Selbstschutz des Materials wird lediglich um das nötige Maß ergänzt.

Dieses Zulassen der Erosion kann als materialgerechter Gebrauch des Stampflehms gesehen werden – als Zusammenarbeit mit dem Baustoff, welches es ermöglicht, ihn besonders pur zu verwenden, und hierdurch den Einsatz von Kalk und Zement zu minimieren.

Gestalterische Bedeutung

Die kalkulierte Erosion definiert jedoch nicht nur ein funktionales Prinzip. Sie hat für Rauch auch eine ästhetische Bedeutung. Die zunehmende Rauheit und „Alterung“ der Fassade ist für ihn kein notwendiges Übel, sondern eine besondere Qualität. Das Zulassen dieser Veränderungen ist für ihn sogar *„Teil der Konstruktions- und Gestaltungsstrategie.“*¹²¹

In ähnlicher Weise ist auch die Erosionsbremse für Rauch nicht allein Mittel zur Reduktion der Erosion, sondern gleichermaßen gestalterisches Element. So verweist er in seinem Einsatz der horizontalen Leisten auf den Herstellungsprozess des lagenweisen Verdichtens der Erde, der Schichtung, dessen Abbild für ihn die Wandoberfläche ist:

120 vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 70: *„Anfangs ist mit einer erhöhten Erosion der Feinanteile zu rechnen, die jedoch innerhalb von zwei bis drei Jahren stark abnimmt.“* *„Da dieser Prozess vorauszusehen ist und die Bremsen ihn steuern, ist von einer kalkulierbaren bzw. von einer kalkulierten Erosion die Rede.“*

121 Rauch 2010, S. 113

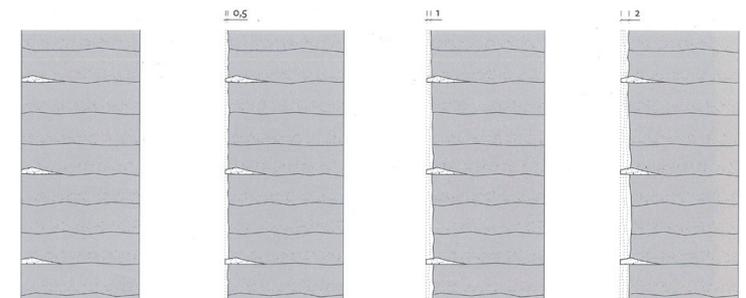


Abb. 3-35: Erosionsbremsen und fortschreitende Erosion

114 Gespräch mit Martin Rauch, Darmstadt, April 2017.

115 vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 70

116 vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 72. In vorherigen Publikationen wurden als Abstand 30 – 60 cm (Rauch 2013) bzw. 25 – 30 cm (Rauch 2003) angegeben, was vermutlich auf eine Verbesserung der Technik im Laufe der Zeit zurückzuführen ist.

117 vgl. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 48. Dieses Maß der Erosion ist deutlich höher als die von Bui et al. (vgl. S. 67) und Dahmen (vgl. S. 67) genannten Maße. Ein Grund hierfür könnte darin liegen, dass letztere sich auf Wandhöhen von lediglich 1,1 m bzw. 1,85 m beziehen.

118 Ebd.

119 vgl. Heringer, Howe, Rauch 2019, S. 49

„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 [...] 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 [...] Sie sind in der Höhe gestaffelt [...] 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.“¹²²

Die gestalterische Kraft der Erosionsbremse liegt vor allem darin, dass sie diese natürliche Erscheinung der Stampflehmwand – mit ihren Schichten, die vom Erstellungsprozess erzählen – unterstreicht. Der Rhythmus der ungleichen Abstände der Erosionsbremsen, für den sich Boltshauser und Rauch beim Bau des Hauses Rauch entschieden (vgl. Abb. 3-5, S. 37), vermag dies in besonderer Weise.¹²³

3.3.4.2 Vorläufer und Referenzen

Im Bereich der traditionellen, vernakulären Architektur, als auch im zeitgenössischen Bauen, lassen sich einige wenige Beispiele von Schutztechniken finden, die eine dem Prinzip der kalkulierten Erosion ähnliche Herangehensweise an die Schlagregenproblematik zeigen.

Pisé (Frankreich)

In der traditionellen Pisé-Bauweise wurde wahrscheinlich ab Anfang des 17. Jh. damit begonnen, Lagen aus Trasskalk zwischen

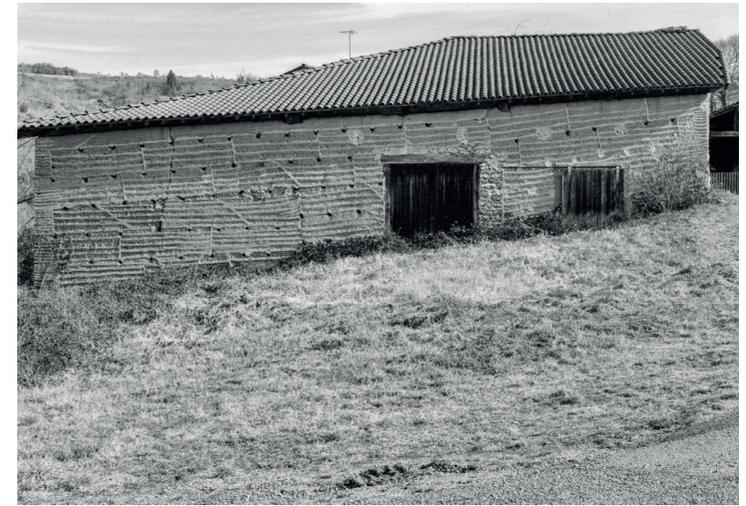


Abb. 3-36: Scheune, Département Loire, Frankreich

den Schalabschnitten anzuordnen.^{124, 125} Dies geschah zum einen, um die Schwindrissgefahr in diesen Bereichen zu minimieren, da Trasskalkmörtel über mehrere Wochen seine plastische Konsistenz bewahrt (vgl. S. 43), zum anderen boten die Kalklagen einem gegebenenfalls im Nachhinein aufgetragenen Kalkputz besseren Halt. Zudem dienten die Kalklagen aber auch der Verstärkung der Ränder der Schalabschnitte, da der Lehm an diesen Stellen nicht optimal verdichtet werden konnte. Bei nicht verputzten Gebäuden kam ihnen insofern eine wichtige Funktion zur Stabilisierung der Oberfläche, und damit des Schutzes vor Erosion zu. Die Dicke der Leisten bzw. ihr Abstand untereinander stand in Verbindung mit der Qualität des verwendeten Lehms (Abb. 3-37, Abb. 3-38). So kamen z. B. bei feiner und gering bindiger Erde zum Teil Kalklagen nach jeder Stampflage (ca. alle 10 cm) zum Einsatz. In besonders exponierten oder beanspruchten Bereichen wie den Gebäudeecken, oder auch Öffnungs-laubungen, wurden vielfach Verstärkungen in Form besonders dichter Anordnung von Kalklagen vorgenommen.¹²⁶ Auch wurden charakteristische, dreiecksförmige Verstärkungen an den Gebäudeecken ver-

¹²⁴ vgl. Guibaud 2005, S. 12

¹²⁵ Die vertikalen Fugen verlaufen je nach regionaler Ausprägung der Bauweise vertikal oder schräg.

¹²⁶ vgl. Pignal 2005, S. 34

¹²² Kapfinger, Sauer 2015, S. 73

¹²³ vgl. Simon 2010, S. 25



Abb. 3-37: Landwirtschaftsgebäude, Département Loire, Frankreich, wahrscheinlich 17. Jhr.

wendet. Bei Houben und Guillaud findet sich zudem der Hinweis auf eine Technik zur Stabilisierung der Oberfläche (in englischer Übersetzung „Twin Layers“ genannt), welche oberflächennahe Kalklagen in sehr engem Abstand verwendet.¹²⁷

Ab dem 19. Jh. wurde der Einsatz von Kalk noch umfangreicher, da das Material leichter verfügbar wurde. Breitere Fugen und ausgeprägtere Verstärkungen an den Gebäudeecken waren die Folge.¹²⁸ Zu Beginn des 20. Jahrhunderts schließlich kam auch den ästhetischen Aspekten des Einsatzes der Kalkfugen mehr Bedeutung zu. Die Kalkfugen wurden zunehmend gerader und gleichmäßiger ausgeführt, und der Behandlung der Gebäudeecken kam eine dekorative Bedeutung zu.¹²⁹

Aufgrund ihrer sowohl technischen als auch gestalterischen Bedeutung können in den Kalklagen der traditionellen Pisé-Architektur zu einem gewissen Grad Vorläufer der Erosionsbremse gesehen werden. Bei unverputzten Stampflehm-Gebäuden mit geringem Dachüberstand, von denen in der Region um Lyon und Grenoble zahlreiche erhalten sind, trugen sie in vermutlich nicht unwesentlichem Maße zur Beständigkeit der Fassaden bei, und prägen deren Gestalt bis heute.

127 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 334
 128 vgl. Guibaud 2005, Absatz 23
 129 vgl. Guibaud 2005, Absatz 26

Tapia (Spanien)

Vorläufer des französischen Pisé-Baus war die in Spanien beheimatete Tapia-Bauweise. Auch diese bedient sich traditionell der Wanderschalung, mithilfe derer eine Wand in Schalabschnitten erstellt wird. In der Tapia-Bauweise wurden jedoch verschiedenste Techniken zur Verstärkung der Wandoberfläche, sowie zum Schutz gegen Witterungseinflüsse angewandt, welche so vom Pisé-Bau nicht übernommen wurden.¹³⁰

In der „Tapia mit verstärkten Fugen“ (*Tapia con juntas reforzadas*, Abb. 3-38) werden, ähnlich wie bei der Pisé-Bauweise, die Ränder der Schalabschnitte mittels Kalk- oder Gipsmörtel verstärkt, um sie vor Erosion und eindringender Feuchte zu schützen.¹³¹

Bei der „Tapia mit Gipskehlen“ (*Tapia con brencas de yeso*, Abb. 3-39) handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Tapia mit verstärkten Fugen, die eine charakteristische, wannenförmige Ausbildung der horizontalen Kalkfugen aufweist. Diese entsteht zum Teil dadurch, dass sich der Mörtel in den unteren Ecken des Schalkastens während des Stampfens hochdrückt, zum anderen auch durch bewusstes Anhäufen von Mörtel in diesen Ecken, um hier das Stampfen des Lehms zu erleichtern.¹³² Bei der „Valenzianischen Tapia“

130 Auch gibt es Vermutungen, dass die Integration horizontaler Elemente in die Wand zur Erhöhung der Erdbebensicherheit geschah. Vgl. Jaquin 2008, S. 221

131 vgl. Maldonado-Ramos, Castilla-Pascual, Vela-Cossio 1997, S. 28, sowie Mileto 2011

132 Ebd.



Abb. 3-38: Tapia con juntas reforzadas



Abb. 3-39: Tapia con brencas de yeso



Abb. 3-40: Tapia Valenciana



Abb. 3-41: Tapia con verdugadas

(*Tapia Valenciana*, Abb. 3-40) wiederum werden gebrannte Ziegel in kurzen horizontalen und vertikalen Abständen an der Vorderseite der Wand mit eingestampft, um die Oberfläche zu verstärken.¹³³ Bei der „Tapia mit Steinleisten“ (*Tapia con verdugadas*, Abb. 3-41) schließlich wird ein Schalabschnitt jeweils mit einer Schicht gebrannter Ziegel abgeschlossen, wodurch horizontale Bänder in der Wand entstehen, welche der Verstärkung dieser dienen.¹³⁴

Neben diesen Tapia-Grundformen gibt es eine Fülle von Misch- und Unterformen, die u. a. von Gil-Crespo und Maldonado-Ramos beschrieben und kategorisiert wurden.¹³⁵

Weitere regionale Formen

Aus Deutschland berichten Röhlen und Ziegert von historischen Stampflehmbauten, vor allem im östlichen Landesteil, bei denen oberflächennah Naturstein- oder Dachziegellagen in die Fassaden eingestampft wurden, durch welche auch ohne Außenputz eine deutlich höhere Witterungsbeständigkeit erreicht wurde (Abb. 3-43).¹³⁶ Auch Schröder spricht diese Technik an¹³⁷, und bei Houben und Guillaud wird eine Variante unter der Bezeichnung deutsches Verfahren erwähnt (Abb. 3-42).¹³⁸

¹³³ vgl. Mileto 2011

¹³⁴ vgl. Mileto 2011

¹³⁵ vgl. Gil-Crespo, Maldonado-Ramos 2015

¹³⁶ vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 222

¹³⁷ vgl. Schröder 2019, S. 516

¹³⁸ vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 334

In der Ortschaft Al-Alkhalaf in Saudi-Arabien (Region Asir) ist noch heute eine Vielzahl von Gebäuden erhalten, bei denen eine spezielle Technik (in der örtlichen Sprache *Raqaf* genannt) zum Schutz der Außenwände zum Einsatz kommt. Dabei handelt es sich um von der Wand weg geneigte Schieferplatten, welche in einem vertikalen Abstand von etwa 50 cm in die Wand integriert wurden (Abb. 3-44, S. 82). Diese bieten einen Schutz der Wandoberfläche bei starkem Regenfall, welche in der Region üblich sind.¹³⁹ Zudem wirken sie durch die entstehende Verschattung kühlend auf die Wand. Zwar handelt es sich hier nicht um Stampflehm-, sondern um mit Lehmputz versehene Lehmstein- (bzw. Adobe-) Wände, doch lässt sich in dieser Technik durchaus universelle Eignung erkennen.

¹³⁹ vgl. Dethier 1983, S. 65 f.

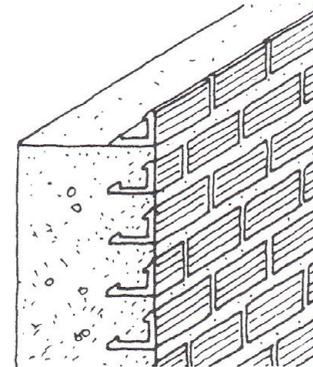


Abb. 3-42: Eingestampfte Ziegelleisten



Abb. 3-43: Eingestampfte Ziegelleisten an einer Scheune in Jügendorf (Sachsen-Anhalt)

Auch aus dem asiatischen Raum sind Beispiele dokumentiert. Dethier etwa erwähnt eine ländliche Siedlung in der Region Xi'an in China (Abb. 3-45), an deren Gebäuden offenbar, ähnlich wie in Al-Alkhalaf, über die Fassade hervorragende, horizontale Bänder aus Stein oder Stroh zum Einsatz kamen.¹⁴⁰ Es kann nur vermutet werden, dass diese auch hier dazu bestimmt waren, Regen von der Fassade abzuhalten. Nicht bekannt ist, ob es sich um eine Stampflehm-, Lehmstein- oder andere Lehmbauweise handelt. Ein weiteres gebautes Beispiel, zu dem leider kaum Informationen vorliegen, ist ein Wohngebäude in der Region Chinmen (China), in dessen Außenwänden aus Stampflehm Ziegelleisten zum Einsatz kamen (Abb. 3-46).

140 vgl. Dethier 1983, S. 88

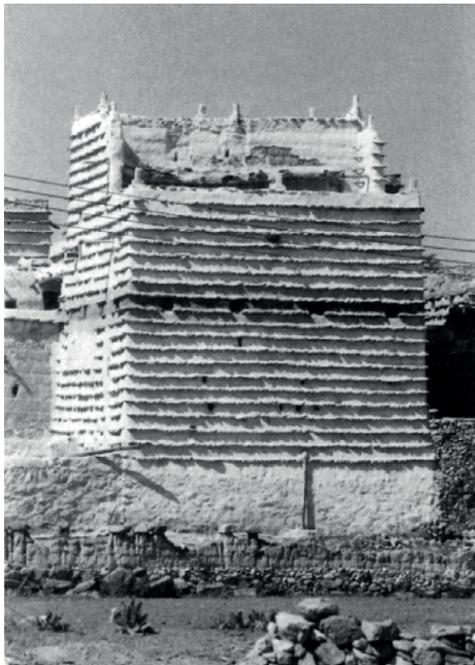


Abb. 3-44:
Raqaf-Architektur in der Ortschaft Al-Alkhalaf, Saudi-Arabien



Abb. 3-45:
Lehmgebäude in Xi'an, Shaan Xi, China



Abb. 3-46:
Ziegelleisten an Stampflehmgebäude, Chinmen, China



Abb. 3-47:
Traditionelle Behausungen des Stammes der Musgum, Kamerun

Ein weiteres Beispiel, welches sich gegenüber den genannten in gewisser Weise abgrenzt, stammt aus Kamerun. Hier werden die Oberflächen der kuppelförmigen *Teleuk*, traditioneller Behausungen des Volkes der Musgum (Abb. 3-47), mit rippenförmigen Strukturen versehen. Diese vereinfachen die Besteigung der Fassade (zur alljährlichen Erneuerung des Außenputzes), und bremsen zudem ablaufendes Regenwasser ab, um hierdurch die Erosion zu verringern.¹⁴¹

141 vgl. Fontaine, Anger 2009, S. 64

Zeitgenössische Beispiele

Im aktuellen Bauen finden sich zudem Adaptionen traditioneller Techniken. Die Architektin Odile Vandermeeren etwa hat bei einem Projekt für eine Berufsschule in Niamey, Niger (2011) gebrannte Tonziegel in die Fassade integriert, welche Regenwasser von der Fassade abhalten und diese verschatten (Abb. 3-48).¹⁴² Bei dieser zeitgenössischen Interpretation der saudi-arabischen Raqaf-Technik handelt es sich ebenfalls um Lehmstein-Mauerwerk.

Am Lehrstuhl für Gebäudelehre der Fakultät für Architektur, RWTH Aachen, wurde 2018 ein kleiner Gartenpavillon für eine Kindertagesstätte der Hochschule realisiert. Die Außenwände bilden vorgefertigte Holzrahmen-Elemente, in welche eine Leichtlehm-Mischung (mit Stroh vermischter, eher feinkörniger Lehm) gestampft wurde. Obwohl ein größerer Dachüberstand vorhanden ist, entschied man sich aufgrund der besonderen Erosionsgefahr bei Leichtlehm dazu, an der Außenseite geneigte Holzleisten in engem Abstand in die Oberfläche zu integrieren (Abb. 3-49).

Bei einem Großprojekt in Ivry-sur-Seine bei Paris (Architekten: Joly & Loiret in Zusammenarbeit mit Wang Shu), im Zuge dessen zwischen 2020 bis 2030 rund 70.000 m² an Wohn- und Gewerbefläche entstehen sollen, sind über die Lehmfassade überstehende



Abb. 3-50:
Projekt in Ivry, Joly & Loiret in Zusammenarbeit mit Wang Shu,
2020-2030 (Visualisierung)

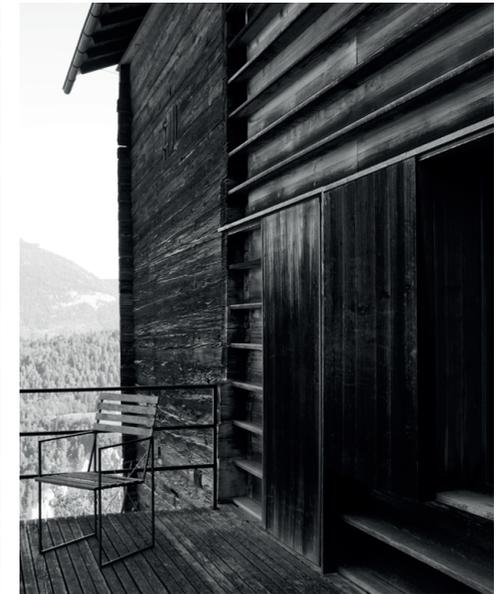


Abb. 3-51:
Haus Gugalon, Peter Zumthor, Versam, Schweiz, 1994

142 vgl. Vandermeeren 2016



Abb. 3-48:
In die Fassade integrierte
Tonziegel, Berufsschule
Niamey, Niger, 2011



Abb. 3-49:
Garten-Pavillon Kita
Königshügel, Aachen, 2018

„Vordächer“ geplant, welche – hier geschossweise – Schlagregen von dieser abhalten (Abb. 3-50).

Ein Beispiel für die Anwendung ähnlicher Techniken im Bereich des Holzbaus ist das Haus Gugalon von Peter Zumthor (1994). Hier wurden horizontale Lamellen als konstruktiver Wetterschutz für die unbehandelte Holzfassade verwendet (Abb. 3-51).



Abb. 3-52: Erosionsrinne auf einem Feld, Toskana, Italien

Weitere Referenzen

Auch in der Natur zählen Wasserbewegungen zu den primären Auslösern von Erosion (Abb. 3-52). In den Bereichen des Wasserbaus, der Landwirtschaft, als auch der Landschaftsgestaltung werden daher mitunter Schutzmaßnahmen ergriffen. Zu diesen zählen vor allem traditionelle Techniken wie die Errichtung von Barrieren in Gewässersohlen, die Bepflanzung von Hängen, oder auch das Anlegen von Drainagekanälen bzw. Wasserrinnen (Abb. 3-53 – Abb. 3-57).

In einigen Gegenden Westafrikas (z. B. in Burkina Faso, Mali, und Niger) werden seit den 1970er Jahren, unterstützt durch westliche Entwicklungshilfe, traditionelle, lokale Techniken zur Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge wiederentdeckt und sukzessive weiterentwickelt. Dabei geht es unter anderem um die Reduktion der Bodenerosion, welche vielerorts für den Verlust wertvollen Mutterbodens verantwortlich ist. Vor allem das Anlegen sogenannter Steinkordeln, ca. 0,3 bis 1 m hoher Steinwälle, stellte sich hier als geeignetes Mittel heraus (Abb. 3-58). Eine weitere Technik besteht im Anlegen 15 bis 20 cm hoher Erdwälle (*Contour Ridges*), welche grundsätzlich die gleiche Funktion wie Steinkordeln ausüben und sehr einfach erstellbar sind.¹⁴³



Abb. 3-53: Barrieren im Bett eines Wasserlaufs, Großbritannien



Abb. 3-54: Anlegen von Erdwällen („Halbmonde“), Mali



Abb. 3-56: Rinne zur Querentwässerung eines Weges, Alpenregion

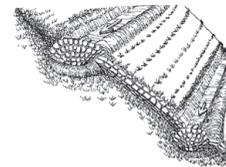


Abb. 3-57: Drainagekanäle an einem Berghang, Neuseeland



Abb. 3-55: Bepflanzung eines Geländehanges, Kalifornien, USA



Abb. 3-58: Steinkordeln, Burkina Faso

¹⁴³ vgl. z. B. Partey et al., S. 289 f. sowie Nyamekye et al. 2018, S. 9

3.3.4.3 Erweiterte Definition kalkulierter Erosion

Die vorgenannten Beispiele lassen sich grob zuordnen zu vier Funktionsprinzipien sowie Kombinationen dieser: dem Schutz vor auftreffendem Wasser, der Bremsung des Wasserlaufs, der Festigung der Oberfläche, sowie der Umleitung des Wassers.

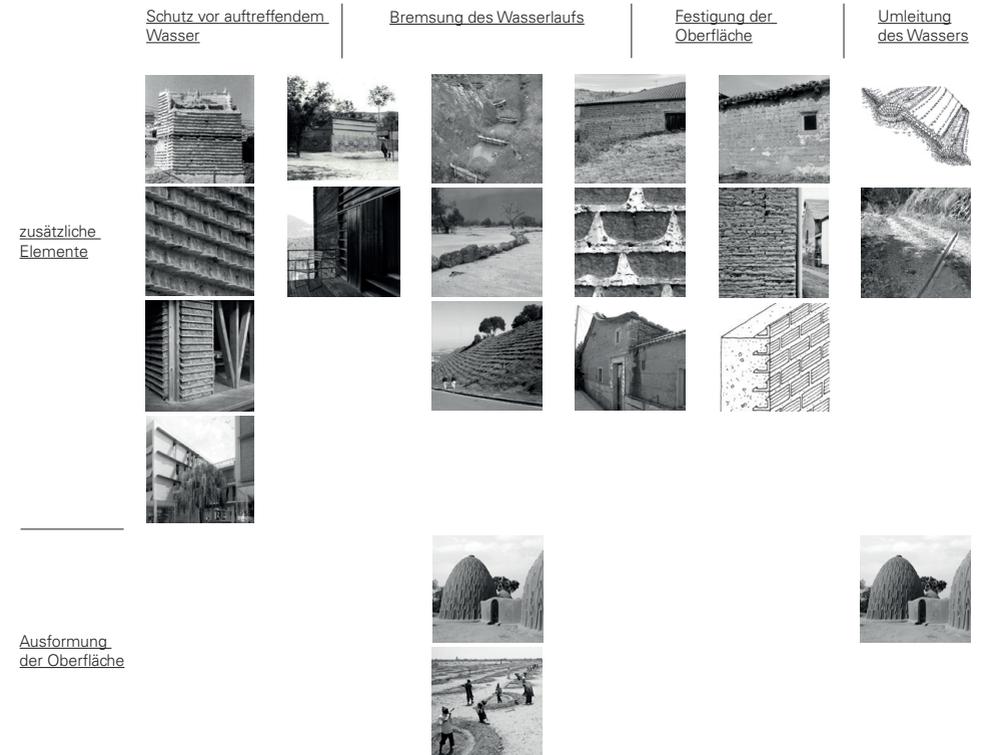
Zudem lässt sich unterscheiden zwischen verschiedenen Mitteln der Umsetzung. In fast allen Fällen handelt es sich dabei um die Integration zusätzlicher, wasserfester Elemente in die Oberfläche. Ebenso gibt es jedoch Beispiele, bei denen die Ausformung der Oberfläche eine Rolle spielt, wie im Falle des Teleuk oder den Erdwällen der Sahelzone (Tab. 3-3).

Was die Beispiele aus dem Bereich der Architektur angeht, so zeigen diese einige Gemeinsamkeiten. Bei allen Techniken wird der Erosionsschutz ohne das Überdecken der Lehmoberfläche erreicht, wodurch diese sichtbar und unverfälscht in ihrem natürlichen Ausdruck bleibt. Ebenso erfolgen keine Beimischungen, d. h. das Grundgefüge des Materials bleibt unverändert. Zudem bedürfen sie nicht der klassischen, auf Ebene des Gebäudes erfolgenden Maßnahme des weit auskragenden Daches, welche in vielen Fällen angemessen ist, jedoch auch konstruktiv-gestalterische Einschränkungen darstellen kann. Vielmehr können sie als Arten des konstruktiven Schutzes auf Ebene des Bauteils bezeichnet werden, welche sich – in technischem als auch ästhetischem Sinne – in die Lehmoberfläche einfügen. Wie von Houben und Guillaud gefordert, verfolgen sie anstelle der Steigerung der Widerstandsfähigkeit des Lehms (durch Stabilisierung oder Putzauftrag) die Steigerung der Widerstandsfähigkeit des Gebäudes, und demonstrieren damit die dem reinen Oberflächenschutz übergeordnete Bedeutung der Qualität des Materials, der Konstruktion, sowie der Konstruktionsabläufe.¹⁴⁴

Die hier gezeigten Techniken verbindet ein gezielter, auf Wissen und Erfahrung gründender Gebrauch einfacher Hilfsmittel, welcher zu effizienten und dauerhaften Lösungen von charakteristischer Gestalt führt. Es sind Techniken, in denen, wie Ponte schreibt,

¹⁴⁴ vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 332 („The necessity of protecting the earth used in the structure, long before being approached at the level of surface protection, remains subordinate to the quality of the material, design, and the construction procedures used for the structure.“)

vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 246 („There is, however, an unfortunate tendency to clad buildings with a view to increasing the resistance of ‚the earth‘ to water (excessive protection of the material) as opposed to the proper approach, which consists of making the ‚building‘ resistant to water.“)



Tab. 3-3: Übersicht Techniken aus den Bereichen Architektur, Landwirtschaft und Landschaftsgestaltung

Funktion und Ästhetik verschmelzen¹⁴⁵ – und welche, was die Herangehensweise betrifft, eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Prinzip der kalkulierten Erosion aufweisen.

In diesem Sinne ließe sich eine *erweiterte Definition kalkulierter Erosion* aufstellen, welche die vorgenannten, sowie weitere, mögliche Funktionsprinzipien und Mittel – weitere *Strategien* mit-samt ihren jeweiligen gestalterischen Auswirkungen – einschließt.

¹⁴⁵ Ponte 2012, S. 165 „Das Ganze besteht in der Fusion von Ästhetik und Funktion, welche zusammenwirken, um das Ziel der Dauerhaftigkeit zu erreichen.“ (Freie Übersetzung) Original (port.): “O conjunto final consiste numa fusão entre a estética e a função, que trabalham em conjunto para atingir a durabilidade.”

4 Explorative Untersuchungen: Strategien der Umsetzung kalkulierter Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk

Dieses Kapitel beinhaltet den ersten Teil der Hauptuntersuchungen der Arbeit. Es werden einige entwurfliche und praktische Untersuchungen dokumentiert, in denen das Thema der kalkulierten Erosion im Kontext der Mauerwerksbauweise behandelt wurde, und somit den Einstieg in die konkrete Auseinandersetzung mit der Ausgangsfragestellung erfolgte.

Dieser Teil der Untersuchungen diente zunächst dazu, das spezielle Themenfeld, welches als noch weitgehend unerforscht bezeichnet werden kann, zu sondieren, und im Zuge dessen die Fragestellung der Arbeit weiter einzugrenzen. Er ist daher gekennzeichnet durch eine eher explorative Arbeitsweise. Der Fokus lag hier auf einer qualitativen statt quantitativen Betrachtung, mit dem Ziel einer ersten Abschätzung des funktionalen und gestalterischen Potentials der untersuchten Techniken. Eine wichtige Rolle spielten dabei auch Aspekte der Herstellung.

Sämtliche in diesem Kapitel behandelte Untersuchungen fanden im Rahmen von Forschungsseminaren für Studierende des Masterstudiengangs an der Fakultät für Architektur der RWTH Aachen statt.

4.1 Entwurfliche und praktische Studien

Zunächst wurden einige freie Studien unternommen, in denen eine erste entwerfliche und praktische Annäherung an das Bauen mit kleinformatischen Stampflehm-Elementen erfolgte. Hierzu wurden verschiedene Lehmstein-Module entworfen und hergestellt, und deren Anwendung in Entwürfen kleiner räumlicher Strukturen untersucht.

Der Entwurf der Lehmsteine erfolgte zunächst zeichnerisch und mithilfe von Modellen, sowie schließlich im Material im Maßstab 1:1. In engem Zusammenhang mit der Entwicklung der Element-Geometrie stand dabei von Beginn an die Konstruktion entsprechender Schalkkästen zum Stampfen der Steine (Abb. 4-1). Für die Herstellung der Schalkkästen wurde mit verschiedenen Holzwerkstoffen experimentiert. Hierbei galt es vor allem, eine ausreichende Stabilität der Konstruktion inkl. der Verbindungsstellen sicherzustellen¹. Ebenso sollte eine möglichst leichte Demontierbarkeit der Schalung möglich sein, da zum Ausschalen eines Elements diese jeweils komplett auseinander genommen werden muss. Als Stampfwerkzeuge wurden einfache, aus Kanthölzern hergestellte Handstampfer verwendet.

Als Ausgangsmaterial für die Stampflehm-Mischung diente feinkörniger, fetter Lehm aus einer Lehmgrube in Aachen-Seffeln (Experimentiergelände für Lehm- und Zieglerbau der RWTH Aachen), welcher durch Zugabe von Sand und Kies der Körnungsgößen 0–16 mm gemagert wurde. Das Ausgangs-Mischungsverhältnis betrug etwa drei gleiche Volumen-Anteile Grubenlehm, Sand und Kies.

Zur Integration von Erosionsbremsen wurde Trass-Kalk-Mörtel feucht in die Schalung eingebracht und zusammen mit dem Lehm verstampft (Abb. 4-3). Die Erosionsbremsen wurden in allen Entwürfen am Steinrand (ein- bzw. zweiseitig) angeordnet, um neben der Bremsfunktion auch alle horizontalen Flächen innerhalb der räumlichen Struktur vor stehendem Wasser schützen zu können. Die Art der Integration als Mörtelschicht erwies sich als einfach in der Herstellung, das Ausschalen und die Handhabung der frisch ausgeschalteten Steine erforderte jedoch besondere Vorsicht, um die Trass-Kalk-Schicht nicht zu beschädigen.

¹ Durch die Verdichtung des Lehms entsteht ein hoher seitlicher Innendruck in der Schalung (vgl. Röhlen, Ziegert 2019, S. 183).

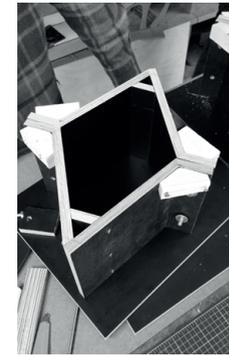


Abb. 4-1:
Schalkkästen



Abb. 4-2:
Materialaufbereitung



Abb. 4-3:
Stampfen der Steine

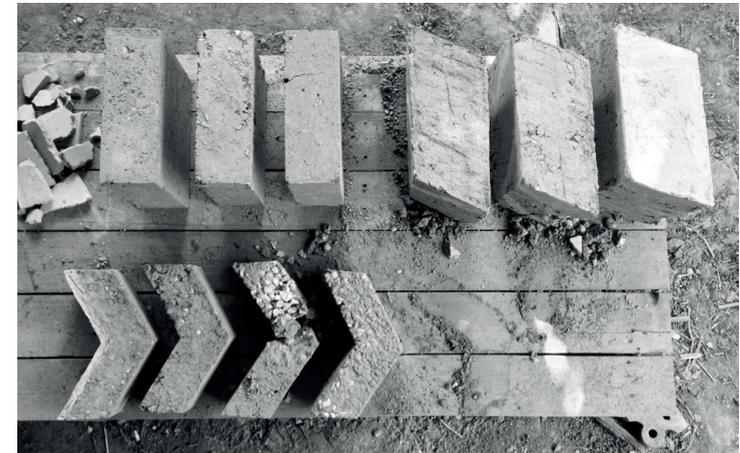


Abb. 4-4: Verschiedene Teststeine je Entwurf

Je Steinentwurf entstanden im Laufe eines mehrwöchigen Entwicklungsprozesses mehrere Probekörper (Abb. 4-4), anhand derer die Körnungslinie (Korngrößenverteilung) der Lehmmischung, deren Feuchtegehalt, der Grad der Verdichtung, als auch die Integration der Erosionsbremse schrittweise optimiert werden konnten.

Als Abschluss einer ersten Phase wurde je Lehmstein-Entwurf ein Mock-Up erstellt, und zusammen mit dem Entwurf für die räumliche Struktur in der Gruppe diskutiert.

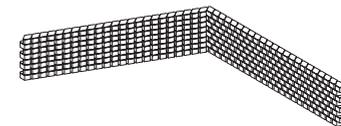
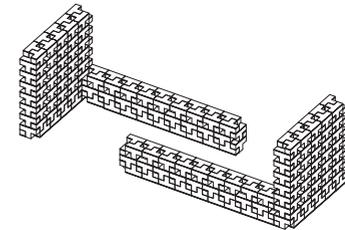
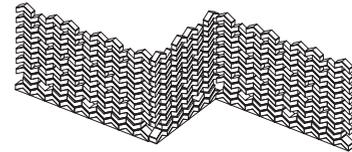
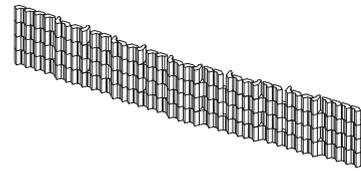


Abb. 4-5: Entwürfe A, B, C, D (v. o. n. u.); Fotos Mock-Ups, Bearbeiter: Ilse Verhaeghe, Lies Quatanne (A); Tobias Kleinschmidt, Isabella Medinaceli (B); Christian Kühnle (C); Carmen Neuhaus, Lukas Schlüter, Leonie Woltermann (D)

Abb. 4-6: Entwürfe A, B, C, D (v. o. n. u.); Axonometrien räumliche Strukturen) Bearbeiter: Ilse Verhaeghe, Lies Quatanne (A); Tobias Kleinschmidt, Isabella Medinaceli (B); Christian Kühnle (C); Carmen Neuhaus, Lukas Schlüter, Leonie Woltermann (D)

Der Hauptunterschied zwischen den entwickelten Modulgeometrien, als auch den durch die Anwendungsstudien veranschaulichten Arten der Fügung, zeigte sich dabei im jeweiligen Grad der Komplexität. Erwartungsgemäß wurden die einfacheren Stein geometrien als wesentlich geeigneter beurteilt, da diese eine geringere Bruchanfälligkeit als auch höhere Toleranzaufnahme bei der Fügung aufwiesen.

In einer zweiten Phase wurde Entwurf D, welcher die positivste Bewertung erhielt, weiter ausgearbeitet, und als temporäre Installation vor dem Foyer des Gebäudes der Architektur-Fakultät der RWTH realisiert. Zur Bauvorbereitung wurden etwa 170 Steine per Hand gestampft, zum Trocknen gelagert, und schließlich zum Aufstellort transportiert. Parallel wurden vor Ort Sockelplatten aus Trass-Kalk-Mörtel geschalt, welche die gleiche Grundrissgeometrie wie die Lehmsteine aufwiesen, und einen Höhenausgleich zum leicht abfallenden Gelände herstellten.² Anschließend wurden die Steine mittels Lehmörtel vermauert.

² Um den Einsatz von Kalk zu minimieren, und da die Mauer lediglich wenige Wochen stehen würde, wurde auf die Ausbildung einer Mindestsockelhöhe (Spritzwasserschutz) verzichtet. Ebenso entfiel die Erstellung einer Horizontalsperre gegen aufsteigende Feuchte.



Abb. 4-7: Transport der Lehmsteine



Abb. 4-8: Schalung der Sockelplatten vor Ort



Abb. 4-9: Aufbau der Mauer



Abb. 4-10: Fertiggestellte Mauerstruktur (Entwurf: Carmen Neuhaus, Lukas Schlüter, Leonie Woltermann)

Im Laufe der mehrwöchigen Standdauer kam es in Teilen der Mauer zu Schädigungen aufgrund durch die Steinoberseiten eindringenden Regenwassers. Der beabsichtigte Feuchteschutz durch die Trasskalk-Lage (Erosionsbremse) auf der Oberseite erwies sich hier somit als unzureichend. Über Feuchteeinwirkungen durch Spritzwasser im Sockelbereich hinaus entstand auf den vertikalen Wandoberflächen nahezu keine Erosion.



Abb. 4-11: Mauerstruktur (Ausschnitt; Entwurf: Carmen Neuhaus, Lukas Schlüter, Leonie Woltermann)

4.2 Mittel der Bremsung des Wassers

In einem nächsten Schritt erfolgte der Übergang zu stärker fokussierten, systematisierten Untersuchungen, mit zudem größerem Anwendungsbezug. Diese bauten im Wesentlichen auf den in Kap. 3 erarbeiteten Grundlagen auf.

Den klassischen Fall einer geschlossenen Gebäudeaußenwand zugrunde legend, wurden nun verschiedene Arten der Anwendung kalkulierter Erosion untersucht. Im Sinne der in Kap. 3 vorgenommenen, erweiterten Definition kalkulierter Erosion (vgl. S. 88), wurden hierbei neben der klassischen Erosionsbremse auch weitere Strategien einbezogen.

Der grundlegenden Unterscheidung zwischen *Funktionsprinzipien* und *Mitteln der Umsetzung* folgend, wurde zunächst vom Funktionsprinzip der Erosionsbremse – der Verringerung der Erosion durch Abbremsen des Wassers (vgl. S. 73) – ausgegangen, und der Frage nachgegangen, durch welche Mittel dieses bei Stampflehm-Mauerwerk umgesetzt werden kann (Abb. 4-12). Neben der Erosionsbremse wurden als weitere, potentiell geeignete Mittel die geometrische und materielle Optimierung der Oberfläche untersucht (Abb. 4-13).

Die geometrische Optimierung geht zurück auf das in Kap. 3 identifizierte Mittel der Ausformung der Oberfläche, konkret auf das traditionelle Beispiel des *Teleuk* (vgl. S. 83). So wurde hier eine Wölbung bzw. Wellung der Oberfläche untersucht, auf welcher

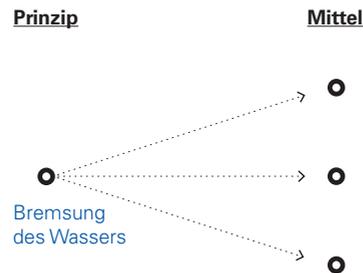


Abb. 4-12: Untersuchungssystematik: verschiedene Mittel der Bremsung des Wassers

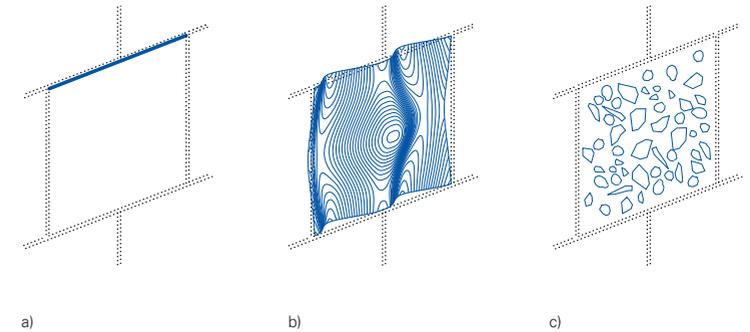


Abb. 4-13: Verschiedene Mittel der Abbremsung des Wassers auf der Wandoberfläche: a) Erosionsbremse, b) geometrische Optimierung, c) materielle Optimierung

vertikal ablaufendes Wasser zu kontinuierlicher Richtungsänderung gezwungen, und hierdurch abgebremst wird.

Die materielle Optimierung dagegen hat zum Ziel, den natürlichen Selbstschutz des Materials (vgl. S. 59) in einem Maße zu erhöhen, dass auch bei Starkregen keine zusätzlichen, schützenden Maßnahmen notwendig sind. In diesem Sinne wurde hier eine Anpassung der Zusammensetzung der Lehmischung speziell im oberflächennahen Bereich untersucht. Dies geschah am Beispiel der Integration besonders grober Kieskörner, welche sowohl tiefer im Stein verankert sind und hierdurch die Oberfläche stabilisieren, als auch das Wasser stärker abbremsen, da sie größere Hindernisse im Ablaufweg bilden.

4.2.1 Durchführung der Untersuchungen

Zu den drei untersuchten Mitteln wurden jeweils konkrete Entwürfe für Mauersteine erarbeitet. Zu jedem dieser Entwürfe wurden wiederum Steine im Maßstab 1:1 hergestellt, und mit diesen kleine Testwände der Abmessungen 49 x 99 cm (b x h) erstellt.³ Zum Zweck einer guten Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde mit einem

³ Als Vorbild dienen hier die in Kap. 3 erwähnten, von Bui et al. untersuchten Probewände (vgl. S. 46).



Abb. 4-14:
Spritzwassertest

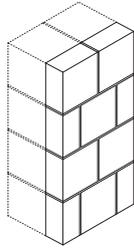


Abb. 4-15:
gekürztes Steinformat

einheitlichen Steinformat und Mauerverband gearbeitet. Als gedachtes Anwendungsbeispiel diente eine 36,5 cm starke Außenwand, welche durch Steine im 12DF-Format (24 x 24 x 36,5 cm) erstellt ist. Da es hier nur um die Betrachtung der Oberfläche gehen sollte, und aufgrund geringer statischer Erfordernisse der Testwände Material und Erstellungsaufwand einsparbar erschien, wurde ein in der Tiefe gekürztes Steinformat von 24 x 24 x 11,5 cm (4 DF) verwendet. (Abb. 4-15)

Um die Funktionsfähigkeit der untersuchten Mittel zu erproben, wurden die fertigen Testwände schließlich künstlich beregnet, und die auftretende Erosion analysiert. Hierbei wurde keine realitätsgetreue Nachbildung natürlichen Regens angestrebt, da die Simulation lediglich eine grobe, qualitative Betrachtung ermöglichen sollte.⁴

Hierzu wurde der Beregnungsstand von Minke (vgl. Abb. 3-30, S. 66) adaptiert bzw. weiterentwickelt. Nach ersten Spritzwassertests anhand kleinerer Testkörper (Abb. 4-14) wurde ein Versuchsaufbau unter Verwendung eines handelsüblichen Rasensprengergeräts erstellt. Dieser sah, wie in Abb. 4-16 gezeigt, einen bogenförmigen Bewurf des Wandstücks vor, wobei Verteilung und Intensität des künstlichen Schlagregens über den Abstand des Sprengergeräts zum Wandstück, den Winkel des Bewurfs, als auch die Wasser-Durchflussmenge eingestellt wurden. Erzeugt wurde auf diese Weise eine Regenmenge, die einem durchschnittlichen Starkregenereignis in Deutschland entspricht.⁵ In Anlehnung an das

4 Eine realitätsnahe Simulation natürlichen Regens ist im Übrigen technisch sehr aufwendig (vgl. Heathcote 2002).

5 vgl. Kap. 3, S. 57. Regenspende $r_{(5,5)} \cdot 312 \text{ l/s} \cdot \text{ha} = 1,87 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$

Modell des Starkregenereignisses gemäß DIN 1986-100 betrug die Beregnungsdauer 2 x je 5 min, mit einer Unterbrechung von 5 min.

Insgesamt wurden acht Entwürfe bzw. Testwände (Tab. 4) erstellt und beregnet.

Erosionsbremse (A)	A1	A2		
Geometrische Optimierung (B)	B1	B2	B3	B4
Materielle Optimierung (C)	C1	C2		

Tab. 4-1: Mittel und Steinentwürfe/Testwände

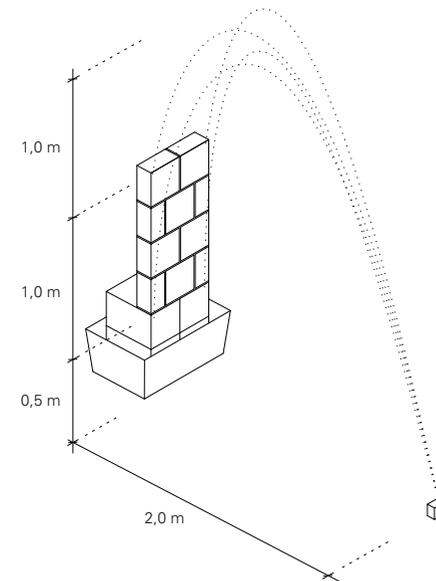


Abb. 4-16: Versuchsaufbau Beregnung



Abb. 4-17: Aufbau einer Testwand

Das Mittel der Erosionsbremse wurde hier anhand vorgefertigter Elemente aus Trass-Kalk untersucht. Dabei wurde von einer besonderen Eignung dieses Werkstoffes ausgegangen, da er, wie in Kap. 3 beschrieben, baustofflich gut mit Lehm harmoniert, und im Lehmbau allgemein breite Anwendung findet. Die Beschränkung auf vorgefertigte, im Stein integrierte Erosionsbremsen erfolgte aufgrund zweier Annahmen. Zum einen wurden in der Vorfertigung mehr Möglichkeiten der geometrischen Ausbildung der Leiste zur Verfolgung funktionaler und gestalterischer Ziele angenommen. Zum anderen wurde vermutet, dass durch die Integration der Erosionsbremse in den Stein, sowie den resultierenden, hohen Vorfertigungsgrad, ein besonders einfacher, effizienter Bauablauf ermöglicht wird.

Die Erosionsbremsen wurden jeweils am Rand des Lehmsteins angeordnet, da im Vergleich mit einer Integration in Steinmitte wesentliche herstellungstechnische Vorteile vermutet wurden. Aus demselben Grund wurden die Elemente bündig mit der Stein- bzw. Wandoberfläche integriert. Entwurf A1 sah eine Erosionsbremse am oberen Steinrand vor. Die Vorderseite des Steines sollte hier nach unten hin zurücktreten, um auftreffendem Regen weniger Angriffsfläche zu bieten, wobei die Oberseite des Steines im vorkragenden Bereich durch die Erosionsbremse überdeckt und somit vor von oben eindringendem Wasser geschützt wird. Bei Entwurf A2 wurden Steine mit einer vertikalen Vorderseite verwendet, an deren Ober- und Unterseite jeweils eine Erosionsbremse angeordnet wurde. Durch die Dopplung des Leistenelements sollten vor allem erweiterte Möglichkeiten der Fügung der Steine durch Ineinandergreifen der Erosionsbremsen untersucht werden. Der größeren Ansichtsbreite und dem höheren Kalkverbrauch im Vergleich mit einer einzigen Leiste wurde durch eine geringere Materialstärke entgegengewirkt.

Zur Untersuchung des Mittels der geometrischen Optimierung der Oberfläche wurden sowohl einachsige, als auch zweiachsige Wölbungen untersucht, und hierzu insgesamt vier Entwürfe erstellt. Die Entwürfe B1 und B2 weisen verschiedene einachsige Wellungen der Oberfläche in vertikaler Richtung auf. Bei den Entwürfen B3 und B4 wurden unterschiedlich stark ausgeprägte, zweiachsige Wellungen der Oberfläche umgesetzt.

Zur Untersuchung der materiellen Optimierung der Oberfläche wurden zwei Entwürfe (C1 und C2) mit jeweils unterschiedlich grobem Zuschlag in der Oberfläche des Lehmsteins erstellt.

Herstellung

Um bei der Ausgestaltung der späteren Vorderseite der Steine die größtmögliche Freiheit zu haben, wurde beschlossen, die Stampfrichtung der Steine um 90° zu drehen, sodass sich die zu formende Fläche an der Unterseite der Schalung befindet (Abb. 4-18). Für die materielle Optimierung etwa konnte so die unterste (vorderste) Stampflage sehr einfach gesondert behandelt werden, bezüglich der geometrischen Optimierung wurde vermutet, dass auf diese Weise eine bessere Verdichtung der gewölbten Bereiche ermöglicht wird.

Die Verdichtung orthogonal zur späteren Belastungsrichtung ist bislang wenig erprobt. 2014 wurden an der ETH Zürich, beim Bau einer Kuppel aus Stampflehm-Fertigteilen, jedoch erste Erfahrungen gesammelt. In vorausgegangenen Untersuchungen war festgestellt worden, dass sich der Wechsel der Stampfrichtung nicht negativ auf die Tragfähigkeit des Bauteils auswirkt.⁶ Allerdings handelte es sich hierbei nicht um direkte bewitterte Oberflächen. Das Verhalten in Bezug auf Erosion bleibt daher zu untersuchen.

Zur Herstellung der Mauersteine mussten zunächst entsprechende Schalkkästen entwickelt und gebaut werden. Aufbauend auf den vorherigen Erfahrungen wurde ein Schalkkasten mit Seitenwänden aus 15 mm starken Siebdruckplatten konstruiert (Abb. 4-19, Abb. 4-20). Die Platten der Schalungs-Längsseiten werden durch vier Gewindestangen zusammengehalten, als Fixierung dienen große Ringmuttern, welche per Hand angezogen und gelöst werden können, wodurch eine einfache und schnelle Montage und Demontage möglich ist. Das untere Ende des Schalkkastens bildet ein Bodenteil, auf welchem die Seitenteile verankert sind, um ein Hochdrücken dieser während des Stampfens zu verhindern.⁷ Zudem sollte es der Schalkkasten ermöglichen, auch halbe Steine herzustellen. Zu diesem Zweck wurden Trennelemente vorgesehen, welche in entsprechende Nuten in den Seitenteilen sowie dem Bodenteil gesteckt werden können.

Um eine größere Durchgängigkeit der Materialqualität zu erreichen, sowie den Aufwand für Mischung und Aufbereitung zu verringern, wurde für die Herstellung der Lehmsteine nun eine industriell hergestellte Stampflehm-Fertigmischung verwendet. Bei

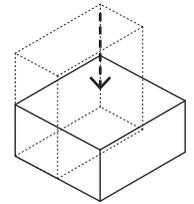


Abb. 4-18: Drehung der Stampfrichtung um 90°

⁶ vgl. Salis 2019, S. 215, sowie <https://www.giansalis.ch/KUPhtml> (abgerufen: 10.09.2018)

⁷ vgl. Röhlen, Ziegert 2019, S. 183

der Verdichtung des Lehms kamen speziell angefertigte Handstampfer aus Edelstahl zum Einsatz.

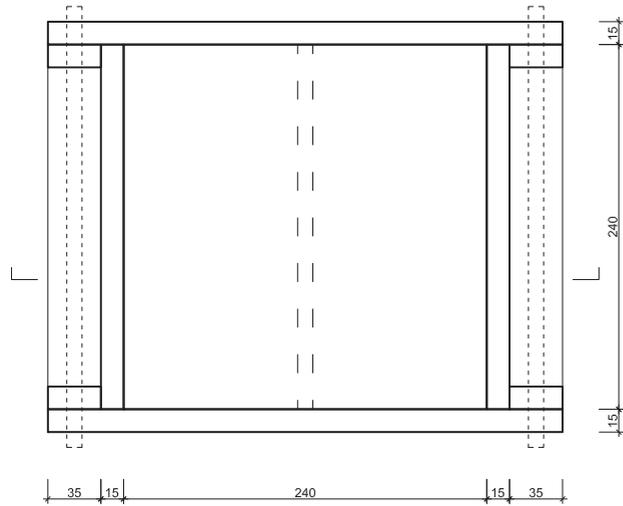


Abb. 4-19: Schalkasten, Grundriss, M. 1:5

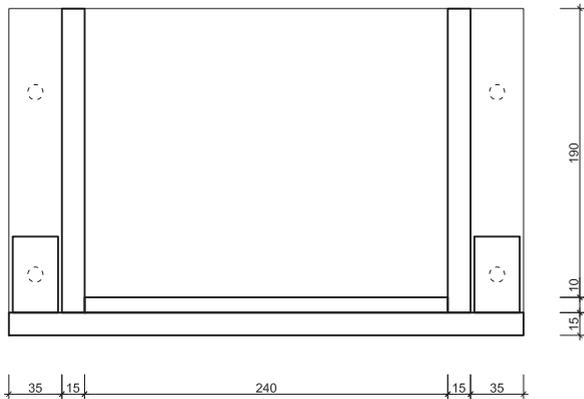


Abb. 4-20: Schalkasten, Schnitt, M. 1:5



Abb. 4-21: Schalkörper für Erosionsbremsen

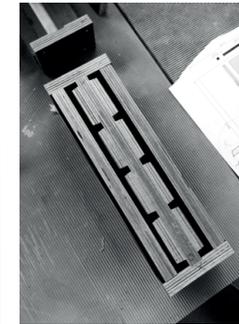


Abb. 4-22: Schalkörper für Erosionsbremsen



Abb. 4-23: Negativform zur Erstellung der Oberflächenwölbung



Abb. 4-24: Stampfen der Steine



Abb. 4-25: Trocknung/Lagerung der Steine



Abb. 4-26: Aufgebaute Testwand

Zur Erstellung der Testwände A1 und A2 wurden im ersten Schritt die nötigen Erosionsbremsen vorgefertigt. Hierbei wurde mit sowohl einfachen als auch komplexeren Schalungsformen aus Holzwerkstoffen experimentiert (Abb. 4-21, Abb. 4-22). Bei der Herstellung der Steine wurden diese in die Schalung eingelegt und der Lehm aufgestampft, wodurch ein Verbund entstand. Für die Testwände B1 bis B4 wurden zunächst Negativformen per CNC-Fräse aus PU-Hartschaum hergestellt (Abb. 4-23), welche vor dem Stampfen der Lehmsteine in die Schalung gelegt wurden und einen Abdruck auf der Unterseite (späteren Vorderseite) des Steines erzeugten.



Abb. 4-27: Erosionsbremse - Testwand A1 (Detailaufnahme) Bearbeitung: Marc Donven, Laurent Neu

4.2.2 Ergebnisse

Aus zeitlichen Gründen wurden die Testwände vor ihrer kompletten Durchtrocknung berechnet, was eine relativ starke Erosion nach sich zog, da die Steinoberflächen das auftreffende Wasser aufgrund der Restfeuchte im Stein stark aufsaugten (Kapillareffekt).⁸ Aufgrund der deutlichen Erosion konnten jedoch wertvolle Beobachtungen zur Funktionsweise der verschiedenen Mittel, als auch zur resultierenden Bauteilgestalt gemacht werden.

Erosionsbremse

Bei der Integration der Leistenelemente in den Lehmstein zeigten sich noch einige Schwierigkeiten, welche jedoch lösbar erscheinen. Dies betrifft zum einen die Festigkeit der Erosionsbremse, welche vor allem während des Stampfens des Steines Druck und Erschütterungen ausgesetzt ist. Vor allem die dünnen Leisten bei Wand A2 erwiesen sich als sehr bruchanfällig. Zum anderen stellte sich die Herstellung eines ausreichend starken Verbundes zwischen Erosionsbremse und Lehm als problematisch heraus. Über ein einfaches Anrauen der Leistenoberfläche hinaus wurde daher auch mit weiteren Techniken zur Erhöhung des Verbundes experimentiert, unter anderem einer Integration von Vertiefungen in der Unterseite der Erosionsbremse, in welche sich der Lehm beim Stampfen hineindrückt. Die hier gewählte Schwalbenschwanz-Verbindung erwies sich jedoch sowohl beim Ausschalen, als auch für den Verbund als nicht optimal.

In den Berechnungstests kam es zu einer merklichen Abbremsung des Wasserablaufs, sowohl durch die Umleitung des Wassers über die Erosionsbremsen in Testwand A1, als auch durch die Erosionsbremsen in Testwand A2 (nach Hervortreten durch einsetzende Erosion). Ebenso konnte eine Stabilisierung der Steinränder an der horizontalen Mauerwerksfuge, einem Bereich, der sich als besonders erosionsgefährdet herausstellte, beobachtet werden. Die Wandoberflächen insgesamt zeigten sich in Teilen instabil, größere Bereiche wurden stark ausgewaschen (Abb. 4-28, Abb. 4-29). Die Dopplung der Erosionsbremse (oberer + unterer Steinrand) ergab hingegen keine ersichtlichen Vorteile.

In gestalterischer Hinsicht zeigte sich vor allem die Eigen-

⁸ Für die Feuchtebeständigkeit der Lehmoberfläche ist es von Bedeutung, dass der Stein komplett durchgetrocknet ist bzw. sein Ausgleichsfeuchte angenommen hat. Dann verhält sich die Stampflehmoberfläche ähnlich eines trockenen Schwamms, welcher Wasser nicht direkt absorbiert.



Abb. 4-28: Erosionsbremse - Testwand A1 (vor Beregnung / nach 5 min. Beregnungsdauer / nach 10 min. Beregnungsdauer)
Bearbeitung: Marc Donven, Laurent Neu

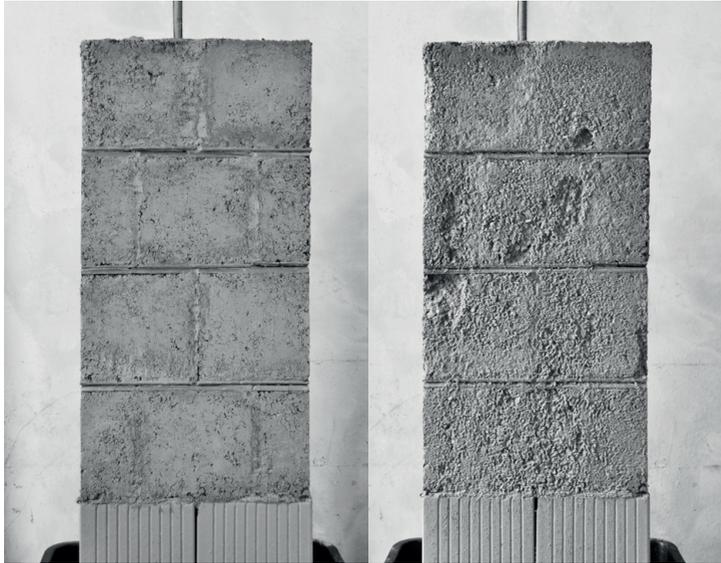


Abb. 4-29: Erosionsbremse - Testwand A2 (vor Beregnung / nach Beregnungsdauer von 10 min.)
 Bearbeitung: Han-Sol Cho, Per Pink

schaft der Erosionsbremse, der Wandoberfläche Struktur zu verleihen. Durch die Integration in bzw. an den Fugen werden diese betont, und die Erosionsbremsen fügen sich auf selbstverständliche Weise in das Mauerwerksgefüge ein.

Geometrische Optimierung der Oberfläche

Die Wellung der Oberfläche stellte sich als einfach in der Herstellung heraus, und zeigte auch in gestalterischer Hinsicht Potential. Zudem konnte sie in den Beregnungsversuchen als grundsätzlich geeignetes Mittel bestätigt werden. Der Wasserablauf wurde merklich abgebremst, wobei der Effekt bei Testwand B4 (Abb. 4-33, S. 114) aufgrund der enger bzw. tiefer ausgebildeten Wellung am deutlichsten zu beobachten war.

Die Wellungsgeometrie flachte jedoch im Laufe der Beregnung zunehmend ab. Der Grund hierfür scheint darin zu liegen, dass durch die Wellung auf der Oberfläche Bereiche mit unterschiedlicher Erosionsbeanspruchung entstehen. Konvexe, exponierte Bereiche

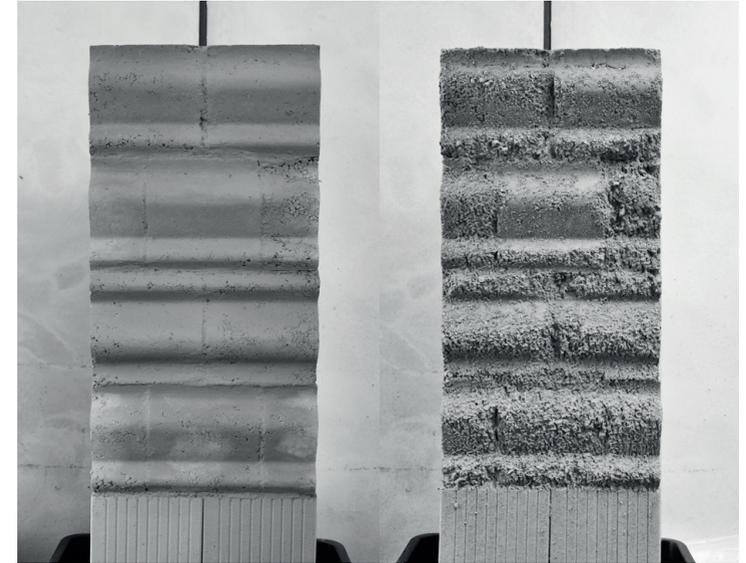


Abb. 4-30: Geometrische Optimierung - Testwand B1 (vor Beregnung / nach Beregnungsdauer von 10')
 Bearbeitung: Swetlana Bell, Sunggyun Lee

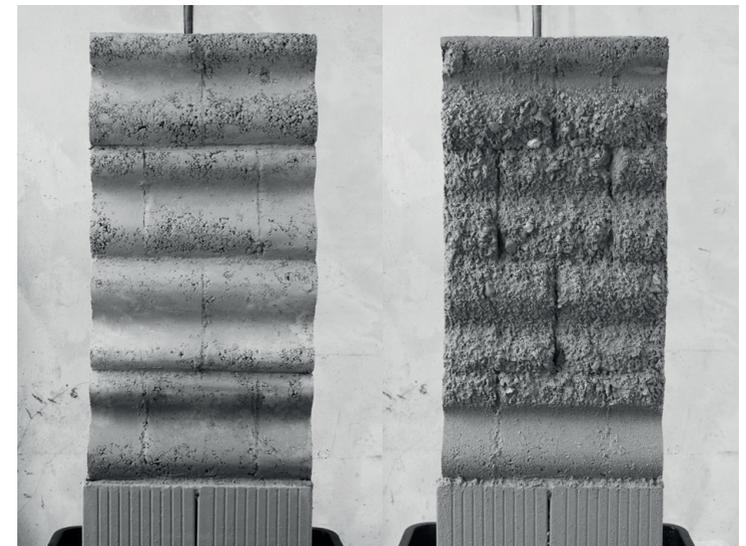


Abb. 4-31: Geometrische Optimierung - Testwand B2 (vor Beregnung / nach Beregnungsdauer von 10')
 Bearbeitung: Swetlana Bell, Sunggyun Lee

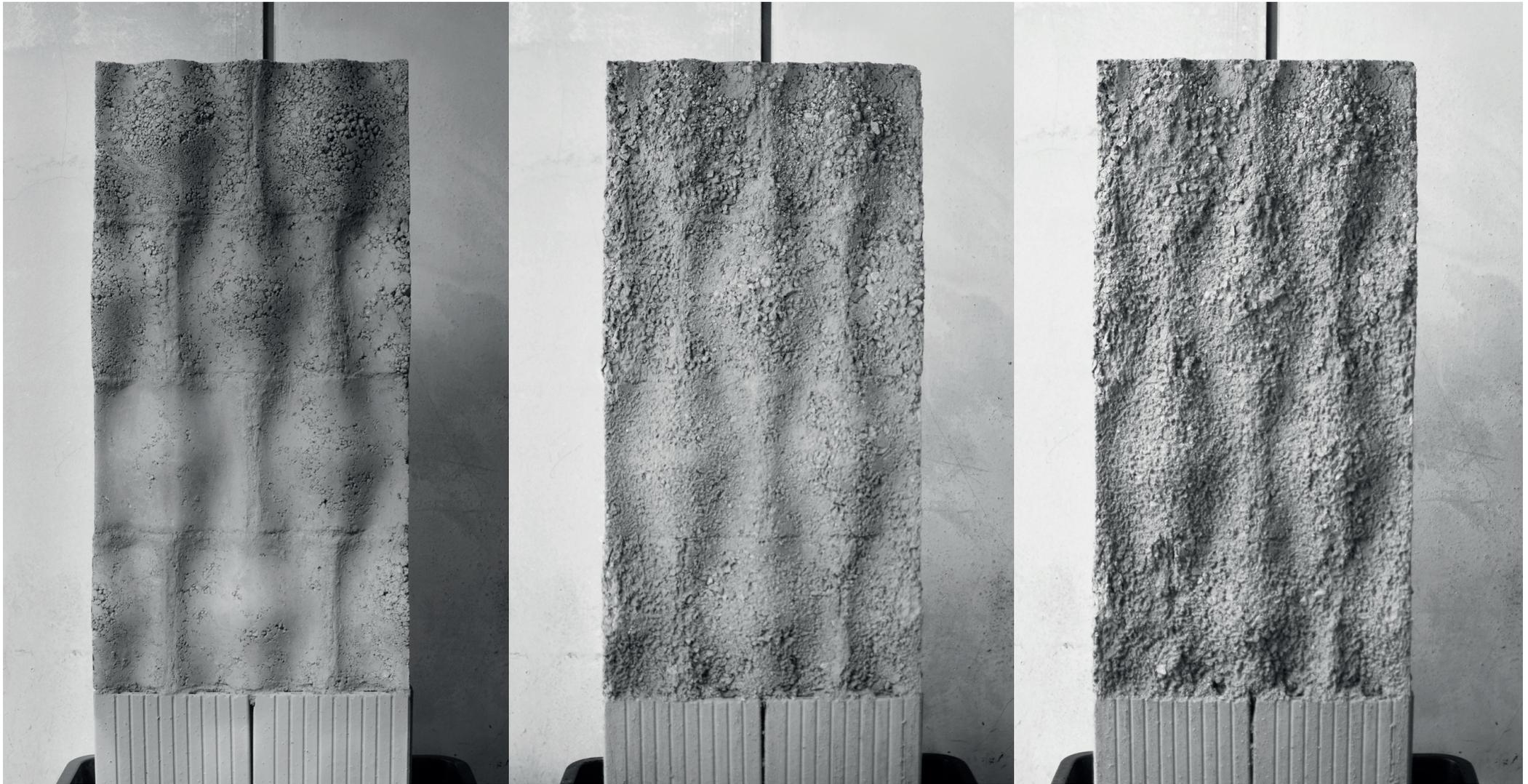


Abb. 4-32: Geometrische Optimierung - Testwand B3 (vor Beregnung / nach 5 min. Beregnungsdauer / nach 10 min. Beregnungsdauer)
Bearbeitung: Daniel Körner, Simon Tschepe

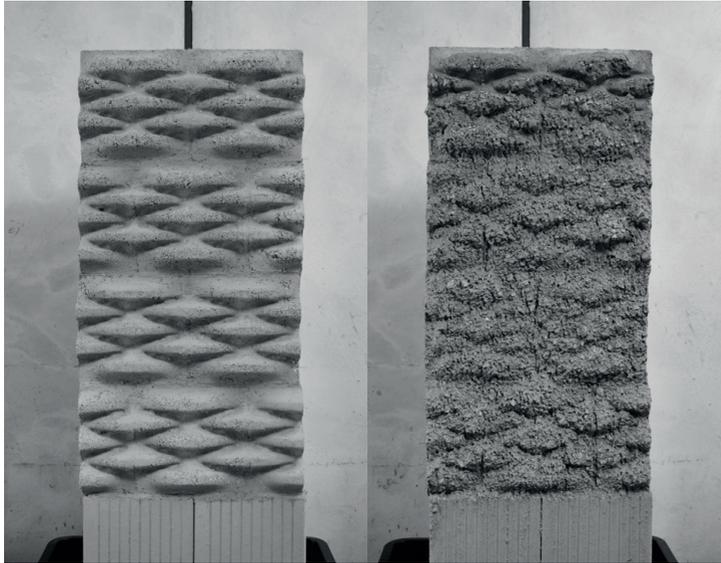


Abb. 4-33: Geometrische Optimierung - Testwand B4 (vor Beregnung / nach Beregnungsdauer von 10')
 Bearbeitung: Daniel Körner, Simon Tschepe

erodieren wesentlich stärker als konkave Bereiche.⁹ Da die Abflachung der Oberfläche mit einer Verringerung der Bremswirkung einhergeht, tritt hier eine Selbstabschwächung auf. Wenngleich der entstehende Gradient der Rauheit in gestalterischer Hinsicht reizvoll erscheint, stellt sich daher die Frage nach der Sinnhaftigkeit dieses Mittels.

Materielle Optimierung der Oberfläche

Bei beiden Testwänden wurde das Feinmaterial an der Oberfläche sehr schnell ausgewaschen, wodurch ein abbremsender Effekt früh zu beobachten war. Bei Wand C1 kam es in Teilen der Oberfläche zu einer Ablösung der Grobkörner (Abb. 4-36, S. 118). Bei Wand C2 (Abb. 4-35, S. 116) wurde daher versucht, den Verbund zwischen diesen und dem hinteren Wandteil durch eine spezielle Zwischenlage aus fettem Lehm zu verbessern. Hierdurch konnte die Festigkeit der Oberfläche im Vergleich sowohl mit Wand C1

⁹ vgl. Hoppe, Schneider 2016, S. 4

wesentlich erhöht werden. Trotzdem liegt die Vermutung nahe, dass die deutliche Erhöhung des Grobkornanteils unter realen Bedingungen stark zulasten der Stabilität der vordersten Stampflage geht. Aufgrund der relativ großen Zwischenräume zwischen den Grobkörnern auf der Oberfläche kann Feuchtigkeit mit der Zeit tiefer in den Wandquerschnitt eindringen und die Verankerung der Grobkörner gefährden. Insofern zeigte sich die Abwandlung der herkömmlichen Korngrößenverteilung hier problematisch.

Aufgrund des groben Zuschlags zeigte sich nach Erosion der Feinanteile eine sehr grobkörnige, raue Oberfläche, in welcher



Abb. 4-34: Geometrische Optimierung - Testwand B3 (Detailaufnahme) Bearbeitung: Daniel Körner, Simon Tschepe

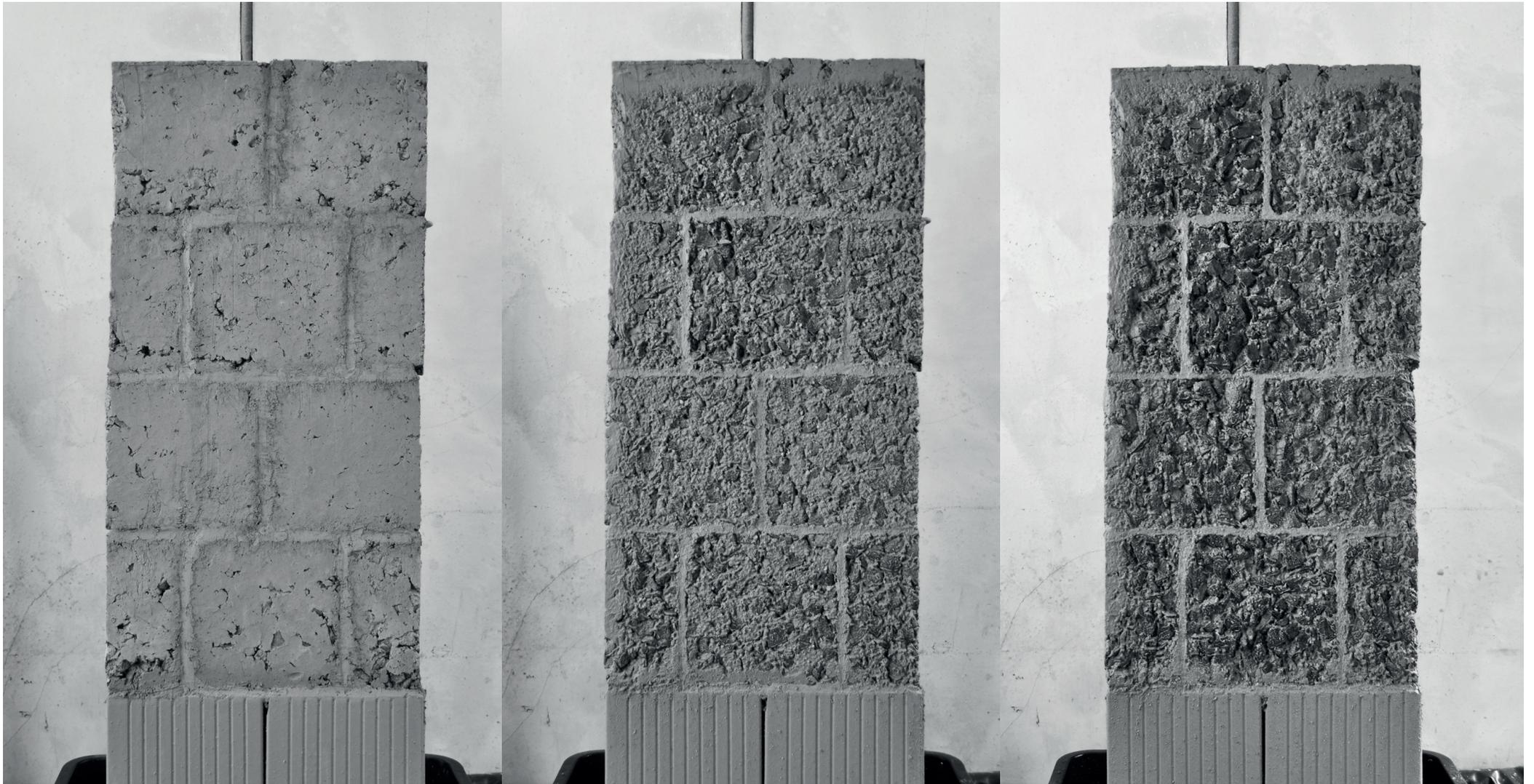


Abb. 4-35: Materielle Optimierung - Testwand C2 (vor Beregnung / nach 5 min. Beregnungsdauer / nach 10 min. Beregnungsdauer)
Bearbeitung: Katrin Amchislavski, Maria Posihalina

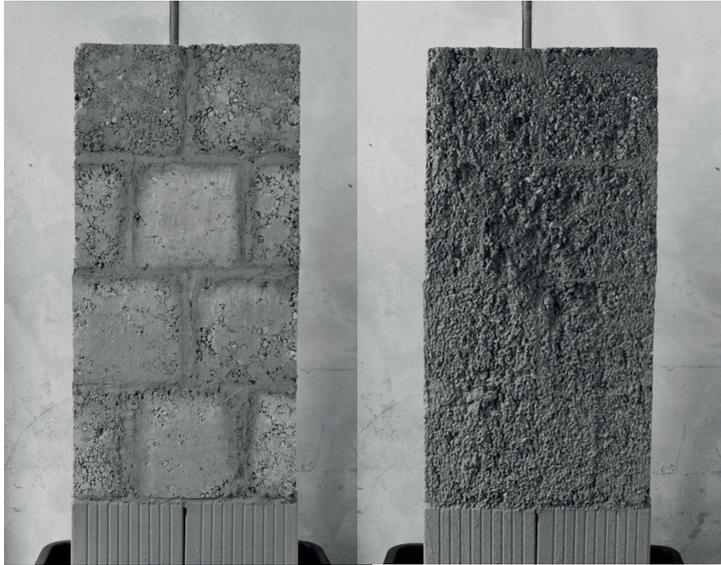


Abb. 4-36: Materielle Optimierung - Testwand C1 (vor Beregnung / nach Beregnungsdauer von 10')
 Bearbeitung: Katrin Amchislavski, Maria Posihalina

die Lehmfugen optisch hervortraten. Hierdurch entstand ein sehr kontrastreiches Oberflächenbild. Die geringe Erosion der Fugen ging dabei auf den hohen Tonanteil im Fugenmörtel zurück, welcher hier verwendet wurde. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei längerer Beanspruchungsdauer auch eine starke Erosion der Fugen aufgetreten wäre, nicht zuletzt deswegen, weil ein hoher Tonanteil die Schwindrisssbildung und hierüber die Aufnahme von Feuchtigkeit fördert.

4.2.3 Schlussfolgerungen

Was die Herstellung betrifft, so stellte sich der Wechsel der Stampfrichtung als zum Teil problematisch heraus. Dieser ist vermutlich Ursache, neben dem hohen Restfeuchtegehalt der Lehmsteine, für die erwähnte, starke Erosion der Lehmoberflächen während der

Beregnungsversuche.¹⁰ Darüber hinaus ist festzustellen, dass durch die orthogonale Verdichtung ein gestalterisches Charakteristikum der Stampflehmwand, die Ablesbarkeit der Stampflagen auf der Oberfläche, entfällt.

Bezüglich der einzelnen Mittel wurden verschiedene Potentiale und Hemmnisse erkennbar.

Die Mittel der geometrischen und materiellen Optimierung der Oberfläche zeigten beide grundsätzliche, funktionale Eignung, jedoch wurden hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit Zweifel aufgeworfen. Bei der Wellung der Oberfläche schwächte sich die abbremsende Wirkung (und darüber hinaus die gestalterische Besonderheit) im Laufe der Zeit ab. Bei der materiellen Optimierung deutete sich ein frühes Versagen aufgrund der Instabilität der Oberfläche an, welches hier, über den Restfeuchtegehalt hinaus, zudem auf die besondere Materialzusammensetzung der vordersten Stampflage zurückzuführen ist. Nicht zuletzt aufgrund ihrer ästhetischen Stärken erscheinen die beiden Mittel trotz allem interessant für eine weitere Untersuchung.

Die Erosionsbremse hingegen zeigte – neben gestalterischem Potential – eine klare funktionale Eignung. Auch bedarf die Verwendung der Erosionsbremse nicht der orthogonalen Stampfrichtung, wodurch ein weiterer Vorteil gegenüber den beiden anderen Mitteln besteht.

Allgemein zeigte sich in den Untersuchungen, dass besonders die Mauerwerksfugen erosionsgefährdet sind. Zurückgeführt wurde dies auf die feinkörnigere Zusammensetzung des Lehmmauermörtels.

¹⁰ Die Steinoberfläche wurde hier durch den unteren Bereich einer Stampflage gebildet, welcher in aller Regel weniger stark verdichtet ist als der obere Bereich, und somit eine geringere Festigkeit als dieser aufweist. (Vgl. Boltshauser 2019, S. 215)
 Eine höhere Festigkeit wäre ggf. durch eine entgegengesetzt gerichtete Verdichtung (Wandoberfläche = oberer Bereich der Stampflage) erreichbar.

4.3 Prinzipien der Manipulation des Wasserablaufs

Unter den im vorigen Abschnitt behandelten, verschiedenen Mitteln zur Abbremsung des Wassers, zeigte die Erosionsbremse das weitaus größte Potential. Daher wurde für den nächsten Schritt der Untersuchungen eine Eingrenzung auf dieses Mittel vorgenommen.

Damit einher ging eine Umkehrung der Betrachtungsweise: in Bezug auf das gewählte Mittel, die Erosionsbremse, wurden nun verschiedene Funktionsweisen bzw. -prinzipien untersucht, welche dieses ermöglicht (Abb. 4-37). Dabei wurde der Frage nachgegangen, wie der Wasserablauf nicht nur gebremst, sondern auch manipuliert werden kann, um die Schutzwirkung entlang der Wand differenzieren, und hierdurch auf Besonderheiten der Mauerwerksbauweise, insbesondere dem Schutzbedarf der vertikalen Fugen, eingehen zu können. Ebenso in den Blick genommen wurden die gestalterischen Auswirkungen des Eingriffs in den Wasserablauf.

Als Prinzipien wurden zum einen ein ungleichförmiges Abbremsen des Wassers, zum anderen die Umleitung des Wassers (vgl. S. 88) untersucht. Durch beide Prinzipien wird eine Gewichtung der Erosionsbeanspruchung entlang der Fassade vorgenommen. Durch ein ungleichförmiges Abbremsen etwa kann an schwach bewitterten Fassadenseiten, an denen kaum Erosion zu erwarten ist, lediglich ein besonderer Schutz der Stoßfugen umgesetzt werden. Durch eine Umleitung und hieraus resultierende Bündelung des Wassers wird in manchen Bereichen eine stärkere Erosion erzeugt,

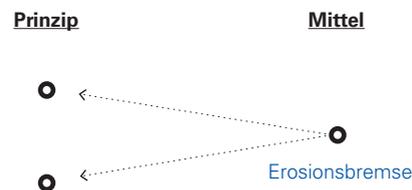


Abb. 4-37: Untersuchungssystematik: verschiedene Funktionsprinzipien der Erosionsbremse

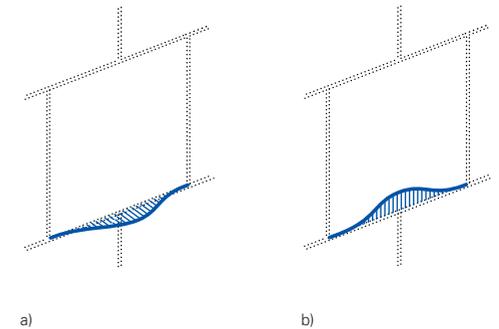


Abb. 4-38: a) Wölbung der Vorderkante, b) Wölbung der Oberseite

während andere Bereiche wenig beansprucht werden. Auch auf diese Weise kann dem stärkeren Schutzbedarf der vertikalen Mauerwerksfugen nachgekommen werden.

Umgesetzt wurden diese Prinzipien durch zwei einfache Modifikationen einer Standard-Erosionsbremse: einer Wölbung der Vorderkante der Leiste, sowie einer Wölbung der Oberseite der Leiste (Abb. 4-38). Die Wölbung der Vorderkante erzeugt ein nicht durchgängiges bzw. ungleichförmig starkes Abbremsen des Wassers. Bereiche, in denen die Erosionsbremse einen größeren Überstand aufweist, werden somit stärker geschützt. Durch die Wölbung der Oberseite der Leiste hingegen entsteht auf dieser ein Gefälle, welches das ablaufende Wasser in Wandachse umleitet.

Neben diesen Grundformen wurden zudem Kombinationen beider Prinzipien – also Erosionsbremsen, welche sowohl eine Wölbung der Oberseite, als auch der Vorderkante aufweisen – untersucht.

4.3.1 Durchführung der Untersuchungen

Auch hier wurden, unter Verwendung des Steinformates 24 x 24 x 11,5 cm, Testwände erstellt und künstlich beregnet. Im Vergleich zu den in Abschnitt 4.2 gezeigten Untersuchungen handelte es sich nun um schmalere, lediglich 24 cm breite und 75 cm hohe Wandstücke, da vermutet wurde, dass diese Größe zur Untersuchung der Funktionsprinzipien der Erosionsbremsen ausreicht.

Insgesamt wurden acht Steinentwürfe bzw. Testwände erstellt (Tab. 4-2).

Ungleichf. Abbremsung (A)	A1	A2	AB1	AB2	AB3	AB4
Umleitung (B)	B1	B2				

Tab. 4-2: Prinzipien und Steinentwürfe/Testwände

Das Stampfen der Lehmsteine erfolgte nun in herkömmlicher, der späteren Belastungsrichtung entsprechender Richtung, da durch die Eingrenzung der Untersuchungen auf das Mittel der Erosionsbremse die Notwendigkeit entfiel, die Oberfläche des Elements differenziert ausbilden zu können.

Zur Herstellung der Lehmsteine wurden zunächst neue Schalkkästen gebaut (Abb. 4-39). Die Änderungen gegenüber den bisherigen Schalkkästen betrafen, neben der geänderten Stampfrichtung, eine Zweiteilung der Kästen in Basis und Steckaufsatz (um eine größere Maßhaltigkeit der Steine erreichen zu können), eine bessere Integration des Trennelements zur Herstellung halber Steine, sowie eine weiter vereinfachte Demontierbarkeit.

Für die Vorfertigung der Erosionsbremsen wurde mit Schalformen aus PU-Hartschaum als zweiteilige Negativ-Formen, als auch mit flexiblen Silikon-Formen experimentiert (Abb. 4-40, Abb. 4-41). Was die starren Formen angeht, so zeigte sich der Vorteil der einfachen Herstellung, jedoch der Nachteil eines zum Teil schwierigen Ausschalens. Die flexiblen Formen wiederum ermöglichten ein sehr einfaches Ausschalen und eine sehr gute Wiederverwendbarkeit, bei einem höheren Herstellungsaufwand für die Formen. Um der Bruchgefahr zu begegnen, wurden sie nun auch stärker dimensioniert (Mindestdicke 15 mm), zudem wurde mit verschiedenen Trass-Kalk-, als auch Feinbeton-Mischungen zur Erhöhung der Festigkeit experimentiert. Hierdurch konnte die Bruchanfälligkeit während des Stampfens wesentlich verringert werden.

Die Erosionsbremsen wurden nun am unteren Elementrand angeordnet, um sie besser mit dem Lehm verstampfen zu können. Auch hier wurden die Erosionsbremsen bündig mit der späteren Steinvorderseite integriert. Um einen besseren Verbund zwischen Lehm und Leistenelement zu erzielen, wurde dessen hinterer Teil als Kammstruktur ausgebildet (Abb. 4-42). Beim Aufstampfen des

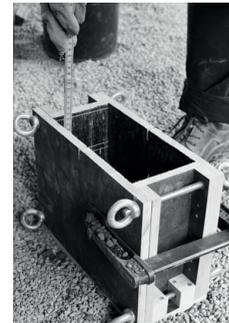


Abb. 4-39: weiterentwickelter Schalkkasten



Abb. 4-40: Vorfertigung von Erosionsbremsen mittels starrer Kunststoffformen

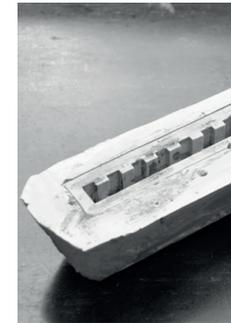


Abb. 4-41: Flexible Silikonform mit Gips-Stützform



Abb. 4-42: fertige Erosionsbremsen

Lehms presst sich dieser in die tieferliegenden Nuten, wodurch eine größere Haftung erzeugt wird. Zum Stampfen der Steine wurde zuerst jeweils eine Erosionsbremse in den Schalkkasten eingebracht und an der Schalungsinenseite, welche der späteren Vorderseite des Steines entspricht, ausgerichtet. Hiernach wurde feinkörniges, ausgesiebtetes Stampflehm-Material in etwas feuchterer Konsistenz auf die Kammstruktur aufgebracht und per Hand angedrückt. Danach erfolgte das Einfüllen der Stampflehm-Mischung für die erste Stampflage.

Nach vollständiger Trocknung der Lehmsteine und Aufbau der Testwände erfolgte schließlich die Beregnung.

4.3.2 Ergebnisse

Im Zuge der Beregnung konnten die verschiedenen Arten des Eingriffs in den Erosionsprozess in ihrer Wirksamkeit grundsätzlich bestätigt werden. Sowohl die Bündelung des Wasserablaufs, als auch das ungleichförmige Abbremsen waren deutlich zu beobachten. Aufgrund veränderter Rahmenbedingungen gegenüber den im letzten Abschnitt gezeigten Untersuchungen (herkömmliche Stampfrichtung, komplette Durchtrocknung der Lehmsteine) kam es auf den Wandoberflächen jedoch zum Teil nur zu geringer Erosion. Während bei den Testwänden, bei denen die Erosionsbremse nur eine Grundmodifikation (Wölbung der Oberseite *oder* Wölbung der

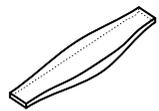
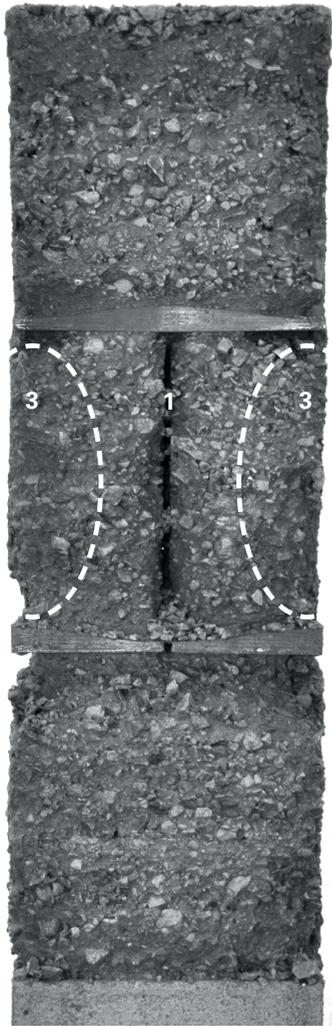


Abb. 4-43:
Testwand AB1 (nach Beregnungsdauer von 10')

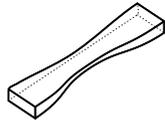


Abb. 4-44:
Testwand AB2 (nach Beregnungsdauer von 10')

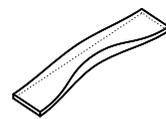
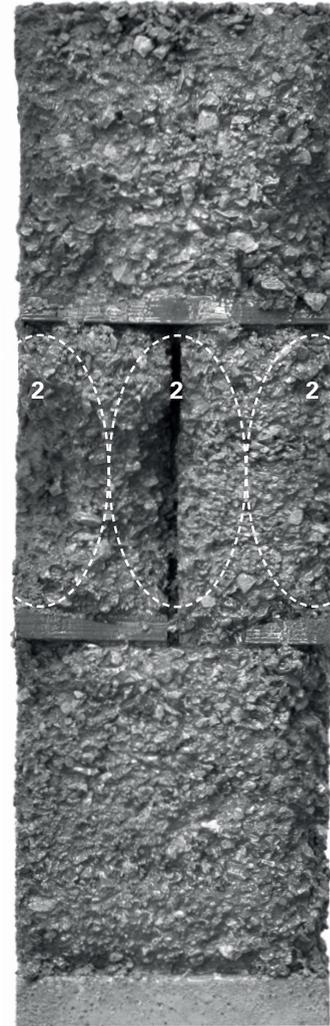


Abb. 4-45:
Testwand AB3 (nach Beregnungsdauer von 10')

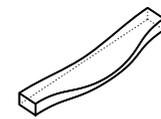
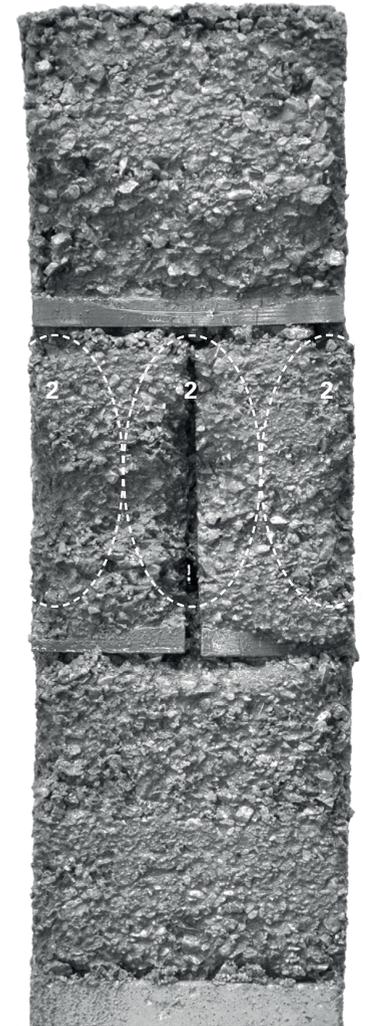


Abb. 4-46:
Testwand AB4 (nach Beregnungsdauer von 10')

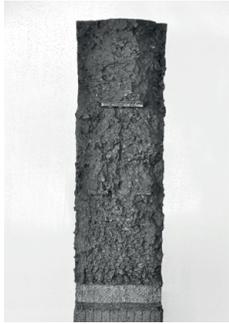


Abb. 4-47: Testwand A1

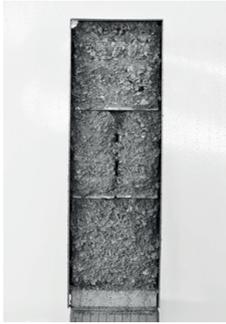


Abb. 4-48: Testwand A2



Abb. 4-49: Testwand B1

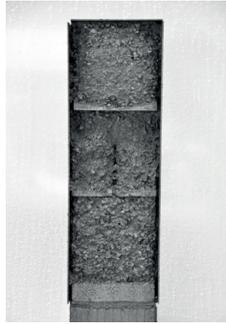


Abb. 4-50: Testwand B2

Vorderkante) aufwies, nur sehr schwache Auswirkungen des Eingriffs in den Erosionsprozess ersichtlich wurden (Abb. 4-47 – Abb. 4-50), zeigte sich bei den Kombinationen (Wölbung der Oberseite und Wölbung der Vorderkante) ein deutlicherer Effekt (Abb. 4-43 – Abb. 4-46, vorherige Seiten). Auch wenn die Randbereiche der Aufbauten grundsätzlich stärker beansprucht wurden, sind Tendenzen klar zu erkennen. Diese sind mit den Ziffern 1 (geringe Erosion) – 3 (starke Erosion) gekennzeichnet.

Bei den Testwänden AB1 und AB2 kamen Erosionsbremsen zum Einsatz, bei denen sich die Wirkungen von Oberflächenwölbung und Vorderkantenwölbung addieren, d. h. die Stelle der größten Vorkragung der Erosionsbremse entspricht der Stelle, die am weitesten von den Stellen der Ableitung des Wassers über die Wandoberfläche entfernt ist. Bezogen auf die Wandmitte, also den Bereich um die Stoßfuge der mittleren Steinlage, lag bei Wand AB1 eine maximale Schutzwirkung, hingegen bei Wand AB2 eine minimale Schutzwirkung vor.¹¹ Die Ergebnisse der Berechnungstest bestätigten die beabsichtigten Manipulationen des Wasserablaufs. Bei Wand AB1 zeigte sich in Wandmitte und auch oberhalb des vorgewölbten Bereichs der Erosionsbremse relativ wenig Erosion, bei Wand AB2 hingegen traten exakt gegenteilige Erosionserscheinungen auf.

Bei Testwänden AB3 und AB4 wurden Erosionsbremsen verwendet, bei denen sich die Wirkungen von Oberseiten- und Vorderkantenwölbung gegenseitig abschwächen, sodass in der Theorie eine relativ gleichmäßige Erosion entsteht. Auch hier bestätigte sich die prognostizierte Auswirkung auf das Maß der Erosion auf

der Wandoberfläche. Sowohl bei Wand AB3 als auch Wand AB4 war eine ähnlich starke Erosion in Wandmitte und an den Wandrändern die Folge.

Wie sich bereits bei den in Abschnitt 4.2 dokumentierten Untersuchungen andeutete, hat die Erosionsbremse eine generell stabilisierende Wirkung auf die Oberfläche. Dieser Einfluss war hier nun noch deutlicher zu erkennen, da durch das Aufstampfen des Lehms und die Verzahnung mittels der Kammstruktur auf der Leiste ein sehr guter Verbund zwischen dieser und dem Lehmstein erreicht wurde. Was die Herstellung und Integration der Erosionsbremse ins Mauerwerks angeht, so zeigte sich jedoch auch, dass die Variante der vorgefertigten, mit dem Stein verbundenen Leiste – in welcher anfänglich das meiste Potential vermutet wurde – in der Praxis noch einige Probleme mit sich bringt. So besteht während der Herstellung Bruchgefahr aufgrund des direkten Aufstampfens des Lehms, weshalb die Elemente relativ stark dimensioniert sein müssen. Zudem überbrückt diese Art der Erosionsbremse nicht die Stoßfuge. Der zu Beginn der Untersuchungen vermutete Vorteil des einfachen Bauablaufs wurde zwar bestätigt, jedoch durch die genannten Nachteile relativiert.

Zur Beurteilung der Auswirkungen, welche die untersuchten Prinzipien auf die Bauteilgestalt haben, zeigten sich die verwendeten Testaufbauten als nur bedingt geeignet. Grund hierfür ist vor allem die geringe Größe, bzw. der hohe Randanteil der Aufbauten, da die stärkere Erosion der Ränder eine Verzerrung des Bildes bewirkt.

¹¹ Wand AB2 dient hier lediglich zur Gegenüberstellung

4.4 Exkurse

Die in den vorigen Abschnitten gezeigten Untersuchungen umfassten ferner weitere Experimente, welche vor allem Fragen der Herstellung und Integration der Erosionsbremse, als auch des Schutzes der vertikalen Mauerwerksfugen betrafen.

So wurde u. a., aufbauend auf den in Abschnitt 4.1 gezeigten Untersuchungen, der Gebrauch von Trasskalk-Mörtel erprobt. Bei einer Testwand (Abb. 4-51) wurden Lehmsteine verwendet, bei denen auf halber Steinhöhe eine Lage Trasskalk mit dem Lehm verstampft wurde. Die Mauerwerksfugen wurden hier mit normalem Lehmörtel ausgeführt. Die Erosionsleisten zeigten einen sehr guten Verbund mit dem Lehm, allerdings, aufgrund des nicht vorhandenen Überstandes, erwartungsgemäß geringen abbremsenden



Abb. 4-51: Testwand mit Erosionsbremsen aus Kalkmörtel

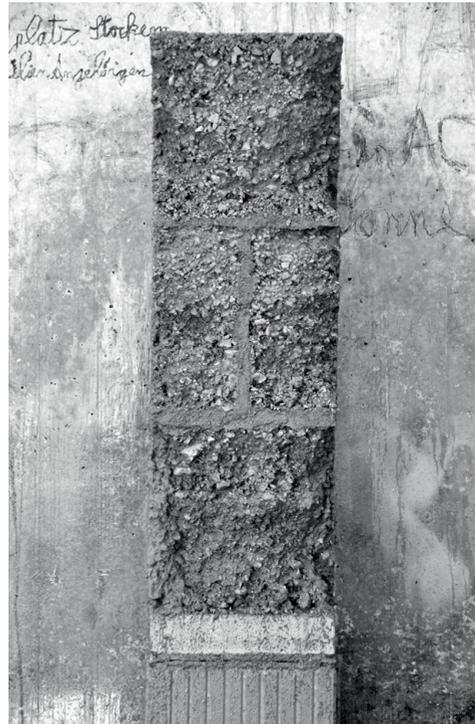


Abb. 4-52: Testwand mit Kalk-Fugenmörtel



Abb. 4-53: Vorgefertigte, getrennt vom Lehmstein gefügte Erosionsbremse (Mock-Up)
Entwurf: Thomas Haber, Lukasz Rubnikowicz

Effekt auf den Wasserablauf.

Bei einer weiteren Testwand (Abb. 4-52) wurde sowohl für die horizontalen, als auch für die vertikalen Mauerwerksfugen Trasskalk-Mörtel anstelle von Lehmörtel verwendet. Über einen sehr einfachen Erstellungsprozess hinaus konnte hierdurch ein wirkungsvoller Schutz der Fugen erzielt werden, welcher allein durch die Optimierung des Lehmörtels nicht erreichbar war.

Ebenso wurde mit der Vorfertigung einer Erosionsbremse als plattenförmigem Element experimentiert, welches vom Stein getrennt in Ebene der Mauerwerksfuge angeordnet werden kann (Abb. 4-53).

Im Zuge dieser Untersuchungen wurde deutlich, dass über das vorgefertigte, mit dem Lehmstein verbundene Element hinaus weitere Arten der Herstellung und Integration von Erosionsbremsen geeignet sein können, und daher ebenso untersucht werden sollten.

4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der in diesem Kapitel gezeigten Untersuchungen wurden verschiedene Strategien zur Umsetzung kalkulierter Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk behandelt. Dabei fand eine sukzessive Eingrenzung der Betrachtung statt. Aufbauend auf einem Einstieg über freiere Studien (Abschnitt 4.1) wurden stärker anwendungsbezogene Untersuchungen unternommen, welche in zwei Schritten (Abschnitte 4.2 und 4.3) erfolgten. Da sich in Schritt 1 unter verschiedenen Mitteln die Erosionsbremse als am meisten geeignet erwiesen hatte, wurden die Untersuchungen in Schritt 2 auf diese fokussiert. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch weitere Versuche zu Arten der Herstellung und Integration der Erosionsbremse in das Mauerwerksgefüge.

Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich immer deutlicher die besondere Eignung des Gebrauches der Erosionsbremse bei Stampflehm-Mauerwerk. Der Grund hierfür wird vor allem in den Mauerwerksfugen gesehen. Zum einen ermöglichen diese eine sehr einfache, selbstverständliche Art der Integration der Erosionsbremse in das Bauteilgefüge. Zum anderen kann die Erosionsbremse erheblich zum Schutz der Dauerhaftigkeit der Fugen beitragen. Letzterer Punkt ist von besonderer Bedeutung, da sich zunehmend zeigte, dass sowohl die Stoß- als auch Lagerfugen, bzw. die entsprechenden Steinränder, besonders erosionsgefährdet sind, und somit kritische Bereiche im Gesamtgefüge darstellen können. Vor allem bezüglich der horizontalen Fugen zeigte sich eine große Stärke des Gebrauches der Erosionsbremse: über ihre allgemeine Schutzfunktion des Abbremsens des Wassers hinaus ist sie aufgrund ihrer Lage im Gefüge – eine geeignete konstruktive Detaillierung (z. B. Überstand, Tropfkante) vorrausgesetzt – grundsätzlich in der Lage, auch die horizontalen Fugen und Steinkanten zu schützen.¹²

Zudem zeigten die untersuchten Erweiterungen der klassischen Funktionsweise der Erosionsbremse Potential. So wurde erkennbar, dass durch Manipulationen des Wasserablaufs – wie etwa eine ungleichförmige Abbremsung oder Umleitung des Wassers – einerseits die Schutzfunktion der Erosionsbremse erweiterbar und

an die Mauerwerksbauweise anpassbar ist, und hieraus zum anderen eine maßgebliche Beeinflussung der Bauteilgestalt resultiert.

Angesichts dieser Potentiale des Gebrauchs sollen die weiteren Untersuchungen auf eine vertiefte Behandlung der Erosionsbremse ausgerichtet werden, und hiermit in direktem Zusammenhang auch eine breitere Untersuchung unterschiedlicher Arten der Herstellung und Integration der Erosionsbremse erfolgen. Es soll also untersucht werden, auf welche Weisen der Transfer des Prinzips der kalkulierten Erosion mittels des Elements der Erosionsbremse – im Speziellen durch erweiterte, für die Mauerwerksbauweise adaptierte Funktionsweisen sowie Arten der Herstellung und Integration – erfolgen kann.

Mit dieser Eingrenzung der Ausgangsfragestellung der Arbeit schließt der erste Teil der Untersuchungen ab.

¹² Obwohl der Schutz der Fugen nicht im Fokus der Untersuchungen stand, wurde zunächst versucht, durch Optimierung des Lehm Mörtels eine höhere Dauerhaftigkeit der Fugen zu erzielen. Bei den vertikalen Stoßfugen zeigte sich jedoch, dass – neben Maßnahmen wie der Umleitung des Wassers – erst der Einsatz von Kalkmörtel anstelle eines Lehm Mörtels eine merklich besseren Schutzwirkung zur Folge hat.

5 Konfirmatorische Untersuchungen: Erosionsleisten

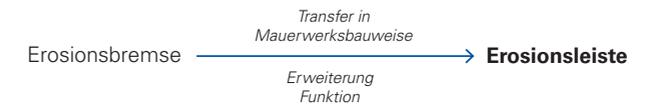


Abb. 5-1: Ableitung der Erosionsleiste

Erosionsleisten

Wie im vorigen Kapitel deutlich wurde, zeigt die Erosionsbremse – insbesondere die Erweiterung ihrer klassischen Anwendungsform – großes funktionales und gestalterisches Potential zur Umsetzung kalkulierter Erosion in Stampflehm-Mauerwerk.

Um dieses Potential weiter zu erforschen, erfolgt in diesem zweiten Teil der Untersuchungen eine Aufweitung der Betrachtung. Hierzu werden, auch zurückgehend auf traditionelle Techniken (vgl. Kap. 3), unterschiedliche Strategien und mit diesen zusammenhängende Abwandlungen der Erosionsbremse untersucht. Diese abgewandelten Formen lassen sich allgemein beschreiben als leisten- oder plattenförmige Elemente, welche unterschiedliche Funktionsweisen gegenüber dem Regenwasser ausüben, und auf verschiedene Arten in das Mauerwerksgefüge integriert sein können.

Für diese Art von Elementen soll hier der neue Begriff Erosionsleiste eingeführt werden, welcher von der klassischen Erosionsbremse abgeleitet ist. Die Erosionsleiste baut auf der Erosionsbremse auf und erweitert deren Funktionsspektrum, insbesondere um auf die Besonderheiten der Mauerwerksbauweise zu reagieren. Sie stellt somit, was die Funktionsweise betrifft, eine allgemeinere Art der Erosionsbremse dar, jedoch den Gebrauchskontext betreffend eine speziellere Art (Abb. 5-1).

Der Begriff der Erosionsleiste bezeichnet grundsätzlich sowohl horizontale als auch vertikale (Stoßfugen-) Leisten. Da die horizontalen Elemente hier jedoch von weitaus größerer Bedeutung sind, wird die Systematik der Untersuchungen primär auf diese ausgerichtet. Vertikale Erosionsleisten werden in Ergänzung horizontaler Leisten behandelt.

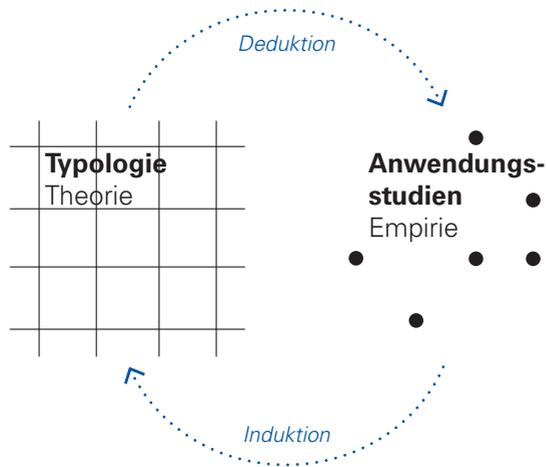


Abb. 5-2: Zusammenwirken von Typologie und Anwendungsstudien

Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungen in diesem Kapitel erfolgen mittels einer aus zwei zusammenwirkenden Teilen bestehenden Methodik: der Entwicklung einer Typologie, sowie der Erstellung von Anwendungsstudien. Dabei leistet die Typologie als gedankliches Gerüst einen Vorschlag zur Definition und Ordnung möglicher Grundformen von Erosionsleisten. Die parallel erstellten Anwendungsstudien hingegen, welche auf dieser Typologie basieren, dienen der genaueren Untersuchung der Charakteristika der unterschiedlichen Typen (Deduktion), und darüber hinaus auch der Überprüfung der Typologie als solcher (Induktion) (Abb. 5-2). Durch diese Untersuchung auf zugleich abstrakter und konkreter, theoretischer und empirischer Ebene, sollen die Möglichkeiten der Gebrauchs von Erosionsleisten ausgelotet und systematisch abgebildet werden, und ein möglichst klares Bild ihrer Anwendungspotentiale und -grenzen entstehen.

Da die Anwendungsstudien weniger zur Untersuchung haptischer Qualitäten, als zum Aufzeigen grundlegender Potentiale der Typen sowie wesentlicher Unterschiede zwischen ihnen dienen sollen, werden diese zeichnerisch durchgeführt, und hierbei eine Abschätzung der zu erwartenden Erosion vorgenommen. Im Ver-

gleich mit einer Untersuchung anhand von Testkörpern (vgl. Kap. 4) ermöglicht das Medium der Zeichnung im Rahmen der Arbeit einen deutlich größeren Untersuchungsumfang, als auch einen anderen Fokus, welche hier zielführend erscheinen. So können beispielsweise auch größere Elementformate, und vor allem größere Fassadenausschnitte betrachtet werden, was nach den Erfahrungen der vorausgegangenen Untersuchungen sowohl für die Untersuchung der Funktionsweise der Leistentypen, als auch für die Beurteilung der Bauteilgestalt notwendig erscheint.

Teil der Anwendungsstudien bildet eine Untersuchung von Möglichkeiten der technischen Umsetzung (Abschnitt 5.3.2), welche die Auseinandersetzung komplettiert, und der Bedeutung der Zusammenhänge zwischen der Art der Herstellung der Erosionsleisten und ihrer Funktionsweise, als auch der Bauteilgestalt, Rechnung trägt.

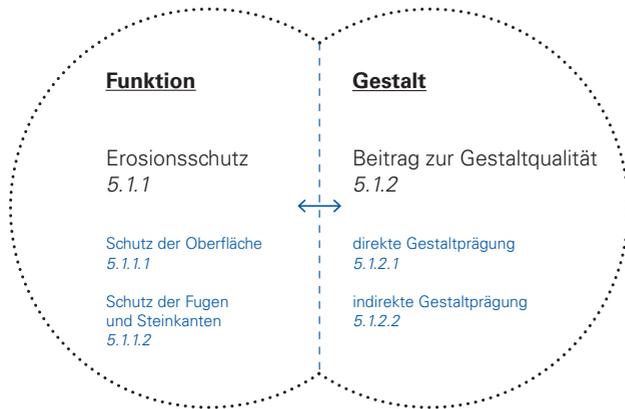


Abb. 5-3: Anforderungen: Funktion und Gestalt

5.1 Anforderungen

Als Startpunkt der Untersuchungen werden zunächst einige Anforderungen an den Gebrauch von Erosionsleisten definiert. Sie gelten zunächst für den Kontext dieser Untersuchungen.

Dabei soll im Wesentlichen zwischen funktionalen und gestalterischen Anforderungen, zusammengefasst unter den Punkten *Erosionsschutz* und *Beitrag zur Gestaltqualität*, unterschieden werden. Diese stehen in enger, wechselseitiger Abhängigkeit, und sind daher grundsätzlich zusammenhängend zu betrachten (Abb. 5-3). Beide Kategorien betreffen insbesondere die Frage, welchen Beitrag Erosionsleisten zum Transfer des Stampflehms in die Mauerwerksbauweise leisten können.

5.1.1 Erosionsschutz

Als primäres Ziel des Gebrauchs von Erosionsleisten kann der Schutz des Wandbauteils vor Erosion gelten. Diesbezüglich lässt sich unterscheiden zwischen dem Schutz der Oberfläche im Allgemeinen, sowie dem der Fugen und Steinkanten im Besonderen.

5.1.1.1 Schutz der Oberfläche

Der Schutz der Wandoberfläche soll hier definiert werden als die Verhinderung eines Maßes an Erosion, welches die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauteils – sowohl in Bezug auf die Standsicherheit, als auch auf die Oberflächenqualität (vgl. Abschnitt 3.3.3, S. 58 ff.) – gefährdet. Dieser Funktion kommt umso mehr Bedeutung zu, je höher die objektiv bewertbare Schutzanforderung ist. Diese wiederum ist abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren.

Auf der einen Seite stehen Faktoren, die in Richtung einer hohen Schutzanforderung weisen. Je stärker diese ausfallen, desto größer ist die Erfordernis eines hohen Erosionsschutzes. Hierzu zählen:

- Lokale Beanspruchung
Die konkrete Schlagregen-Exposition an der betreffenden Fassadenseite ist hier die wesentliche Einflussgröße. Wie in Kap. 3 (vgl. S. 59) dargelegt, kann diese je nach Standort sehr unterschiedlich hoch ausfallen.
- Sicherheitsbedürfnis
Das individuelle Sicherheitsbedürfnis der am Bauvorhaben Beteiligten spiegelt das Vertrauen in Baustoff und Bautechnik wieder, und stellt aufgrund der noch bestehenden Unsicherheiten im Umgang mit Stampflehm einen wichtigen Faktor dar.
- Angestrebte Lebensdauer
Grundsätzlich kann auch die beabsichtigte Dauer der Nutzung des Gebäudes einen Einfluss auf die Schutzanforderung haben.

Auf der anderen Seite gibt es Einflussgrößen, welche mit zunehmender Ausprägung die jeweilige Schutzanforderung verringern:

- Materialqualität
Die Qualität der verwendeten Lehmmischung hat maßgeblichen Einfluss auf die Erosionsbeständigkeit der Bauteiloberfläche. Eine hohe Materialqualität bewirkt einen hohen Selbstschutz des Materials (vgl. Kap. 3, S. 59 und S. 63). Bei Baustellenmischungen spielen dabei sowohl die Qualität des Ausgangsmaterials, als auch die der Aufbereitung des Materials (Zusammenstellung der letztendlichen Mischung durch Veränderung des Ausgangsmaterials, Einstellen des optimalen Feuchtegehalts, etc.) eine Rolle.

- Ausführungsqualität
Ebenso ist die Qualität der handwerklichen Verarbeitung des Materials, vor allem der Ausführung der Stampf- und Maurerarbeiten, von großer Bedeutung.
- Akzeptanz von Instandhaltung und Reparatur
Einen Unterschied kann zudem machen, ob – und wenn ja in welchem Maße – der Gebäudeeigentümer regelmäßige Wartungsarbeiten bzw. Reparaturen in Kauf nimmt.
- Wertschätzung der Erosion
Analog zu letzterem Punkt kann auch eine Rolle spielen, bis zu welchem Maße Erosionserscheinungen in ästhetischer Hinsicht geschätzt werden.
- Gegebene Überdimensionierung der Wand
Was den Aspekt der Standsicherheit betrifft, ist ein weiterer, zu berücksichtigender Aspekt die etwaige Überdimensionierung der Wand, welche auf das modulare Maßsystem des Mauerwerksbaus zurückgeht. Die hierin festgelegte Stufung möglicher Wandstärken bedeutet für die allermeisten Anwendungsfälle, dass bereits ein gewisses Maß der Überdimensionierung in statischer Hinsicht gegeben ist. Dieses „Polster“ kann bis zu 12,5 cm (Modulmaß) betragen.

5.1.1.2 Schutz der Fugen und Steinkanten

Dem Schutz der Mauerwerksfugen kommt eine besondere Bedeutung zu. Wie sich in den vorangegangenen Untersuchungen zeigte, stellen bei Stampflehm-Mauerwerk die Fugen eine Schwachstelle der Erosionsbeständigkeit des Bauteils dar. Im schlimmsten Fall können sie zum Einfallstor für eine tiefere Durchfeuchtung werden, und damit eine kritische Schädigung herbeiführen. Daher ist durch die Verwendung von Erosionsleisten ein ausreichender Schutz der Mauerwerksfugen – sowohl der horizontalen Lagerfugen, als auch der vertikalen Stoßfugen – zu gewährleisten. Aufgrund ihrer Lage in bzw. an den Fugen sind sie für diese Aufgabe in besonderem Maße geeignet.

Was den Schutz der vertikalen Stoßfugen betrifft, so ist deren Beanspruchung sehr von der Wirkungsweise der horizontalen Leiste (vgl. Abschnitt 5.2.1.1) abhängig. In speziellem Hinblick auf diese ist zu entscheiden, ob und in welcher Form im jeweiligen Anwendungsfall Stoßfugenleisten zum Einsatz kommen sollten.

Im Zusammenhang mit der Erosionsanfälligkeit der Fugen steht auch die der Steinkanten. Wegen ihrer geringeren Festigkeit und Exponiertheit sind die Steinkanten die am stärksten durch Erosion gefährdeten Bereiche des Lehmsteins. Im Zuge der Untersuchungen soll daher geprüft werden, ob, und wenn ja, wie, auch die Steinkanten durch den Einsatz von Erosionsleisten geschützt werden können.

5.1.2 Beitrag zur Gestaltqualität

Als grundlegende gestalterische Anforderung an den Gebrauch von Erosionsleisten kann gelten, dass diese zu einer qualitätsvollen Bauteilgestalt beitragen sollen. Hierbei lässt sich weiter unterscheiden zwischen *direkten* und *indirekten* Auswirkungen des Gebrauchs.

5.1.2.1 Direkte Gestaltprägung

Die direkte Gestaltprägung betrifft vor allem grundsätzliche Aspekte des Transfers des Baustoffs in die Mauerwerksbauweise.

Hier stellt sich zunächst die Frage, wie traditionelle Gestaltqualitäten des Stampflehmbaus in diese überführt werden können. Ein wesentliches gestalterisches Charakteristikum von Stampflehmwänden ist ihre Betonung der Horizontalen. Diese entsteht zum einen durch die auf der Oberfläche ablesbaren Stampflagen, welche dem Erstellungsprozess geschuldet sind, zum anderen aber auch durch die horizontalen Kalklagen traditioneller Bauten, bzw. die heute üblicherweise verwendeten Erosionsbremsen. Diese horizontale Prägung kann als besondere Qualität angesehen werden, die auch in der Mauerwerksbauweise bewahrt werden sollte.

Über die Überführung dieses Merkmals hinaus könnten jedoch ebenso neue Qualitäten entwickelt werden. Vor allem, da mit der Mauerwerksbauweise eine vertikale Gestaltkomponente, die der Stoßfugen, ins Spiel kommt, und sich somit die Frage nach dem gestalterischen Umgang mit diesen stellt. Im Gegensatz zum Bauen mit vorgefertigten Großblöcken, bei welchem die Fugen in der Regel aufwändig retuschiert werden, ist die Retusche bei kleinformatigerem Mauerwerk aufgrund des hohen Fugenanteils nicht praktikabel.

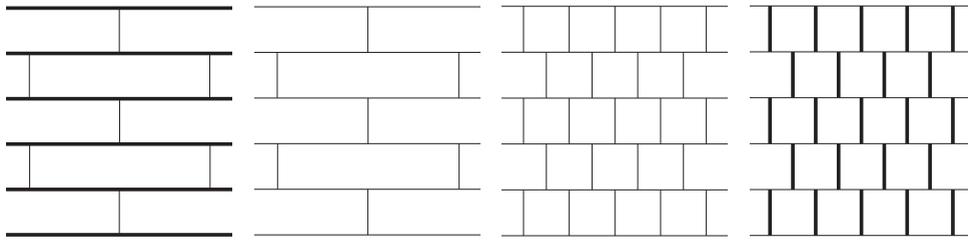


Abb. 5-4: Gestalterischer Einfluss horizontaler und vertikaler Fugen, abhängig von Elementformat und Fugenstärke

Die Existenz der vertikalen Fugen muss jedoch nicht als Nachteil verstanden werden. Die Fugen lassen sich, ganz im Gegenteil, als Möglichkeit begreifen, die Bauweise ablesbar zu machen, und dieser einen eigenen Ausdruck zu verleihen. In der Architekturgeschichte gibt es hierfür zahlreiche Beispiele. Für Sigurd Lewerentz etwa spielte die starke Präsenz der Mörtelfugen eine wichtige Rolle, um den Gefügecharakter seines Ziegelmauerwerks zu unterstreichen. Konrad Wachsmann wiederum schrieb mit Blick auf das elementierte Bauen: „Die Fuge ist kein notwendiges Übel. [...] In der vollkommenen Beziehung von Objekt, Funktion und Trennung vermittelt [...] sie] eine neue visuelle Anschauung.“¹

Ein offenes Zeigen der Fugen referenziert in gewisser Hinsicht auch den traditionellen Stampflehmbau. Wie in Kap. 3 gezeigt, existieren verschiedene historische Beispiele der Integration zusätzlicher Elemente in die Oberfläche, welche diese stärker strukturieren bzw. untergliedern. Diese reichen von relativ homogenen, gering untergliederten Fassadenflächen (vgl. z. B. Abb. 3-41, S. 80) bis hin zu in ihrer Wirkung deutlich gerichteten Oberflächen, bei denen sich die im Bauablauf notwendigen Fugen zwischen den Schalabschnitten in Form von Kalkfugen abzeichnen, und eine zum Teil starke Betonung der Horizontalen (etwa durch dickere Lagerfugen oder schräge Stoßfugen, vgl. z. B. Abb. 3-38, S. 78) entsteht.

In ihren Auswirkungen auf die Bauteilgestalt unterscheiden sich horizontale und vertikale Mauerwerksfugen grundlegend. Während sich die horizontal durchlaufenden Lagerfugen in den Takt der Stampflagen einfügen und das meist liegende Format der Wand betonen, haben die vertikalen Stoßfugen, deren Richtung durch den

¹ Wachsmann 1962, S. 44

Fugenversatz gebrochen wird, eine eher rhythmisierende Wirkung. Die vertikale Komponente der Stoßfugen fällt jedoch je nach Steinformat unterschiedlich stark ins Gewicht (Abb. 5-4), und beeinflusst die Gestalt der Oberfläche vor allem über ihre konkrete Ausgestaltung (z. B. Ansichtsbreite).

Die vermutlich zentrale Aufgabe von Erosionsleisten im Bereich der direkten Gestaltprägung liegt somit in der Ausdifferenzierung von horizontalen und vertikalen Leisten. Sowohl eine formal-geometrische, eine materielle, als auch eine farbliche Differenzierung sind hier möglich. Weiterer gestalterischer Spielraum besteht in der Wahl des Lagebezugs. In aller Regel sollte dabei die Herstellung einer Ausgewogenheit im Ausdruck das Ziel sein.

5.1.2.2 Indirekte Gestaltprägung

Wie sich in Kap. 4 zeigte, kann neben diesen grundlegenden Faktoren zudem der Erosionsprozess die Bauteilgestalt beeinflussen. Diese indirekte, weil *mittels* der Erosionsleiste entstehende Gestaltprägung kann zunächst als aus deren spezieller Funktionsweise resultierend betrachtet werden.² Angesichts der potentiellen Stärke ihres Einflusses erscheint es hier jedoch angebracht, das Verhältnis

² Ein weiterer, indirekter gestalterischer Aspekt betrifft den Einfluss der Erosionsleiste auf die Wirkung der Wandoberfläche während des Regenereignisses, d. h. den konkret erfahrbaren Eingriff in den Wasserablauf, welcher sich erst über die Zeit auf der Oberfläche abzeichnet. Dieser Aspekt soll hier jedoch außer Acht bleiben.

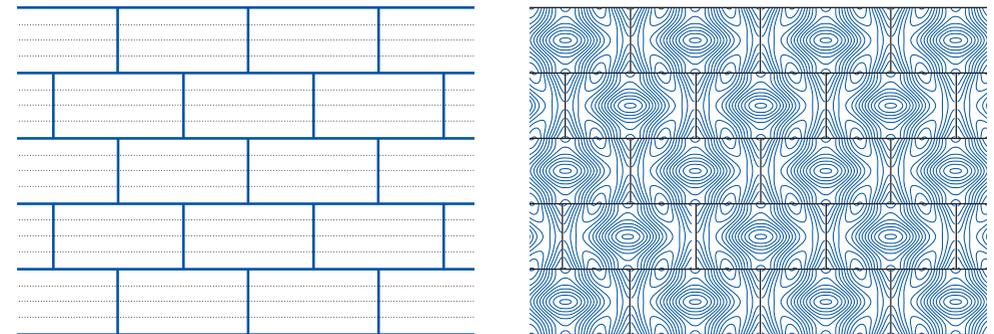


Abb. 5-5: direkte und indirekte Gestaltprägung

von Funktion und Gestalt nicht nur als eindirektionale, sondern vielmehr wechselseitige Abhängigkeit zu sehen.

Aufbauend auf den Untersuchungen in Kap. 4, Abschnitt 4.3 (ab S. 120), soll die Schutzwirkung der Erosionsleiste daher im weiteren nicht nur für sich genommen, sondern in engem Zusammenhang mit ihrem gestalterischen Ausdruck untersucht werden.³ Ein Beispiel wäre hier die gezielte Umleitung und Bündelung des Wasserablaufs, durch welche zum einen ein besonderer Schutz der Stoßfugen realisierbar ist, und zum anderen – über die resultierende Gewichtung der Erosionsbeanspruchung – eine gestalterische Einflussnahme erfolgen kann. Zudem ist es möglich, etwa im Zuge der Minimierung des Kalk- bzw. Zementverbrauchs (siehe Abschnitt 5.1.3, unten), eine stärkere Erosion zuzulassen, und hierdurch auch die gestaltprägende Kraft des Erosionsprozesses stärker zur Geltung kommen zu lassen.

Grenzen des Zulassens der Erosion

Grundsätzlich ist der akzeptierte, kalkulierte Grad der Erosion jedoch mit Blick auf die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauteils (vgl. S. 137) zu begrenzen. Hierfür sollen einige Leitlinien aufgestellt werden.

Was die Tragwerkssicherheit angeht, so kann der Einfluss der Erosion bereits bei der Bauteildimensionierung berücksichtigt werden. Hierzu ist das zu erwartende Maß der Erosion im Voraus abzuschätzen, und der nach statischer Notwendigkeit bemessenen Wandstärke zuzuschlagen. Das heißt, der auf die Erosion zurückgehenden, prognostizierten Schwächung des Wandquerschnitts wird durch entsprechende Überdimensionierung entgegengewirkt. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um flächige oder nur in Teilbereichen der Oberfläche auftretende Erosion handelt. Falls lokale Erfahrungswerte fehlen, also die Prognose der Erosionstiefe nur wenig verlässlich ist, können zusätzliche Sicherheitsfaktoren hinzugezogen werden.

Gegenüber einer Kopplung der maximalen Erosionstiefe an die Wandstärke und der Verrechnung dieser mit den Sicherheitsfaktoren der Bemessung (vgl. Kap. 3) bietet sich die Addition eines absoluten Maßes aus mehreren Gründen an. So ist beispielsweise

eine Unabhängigkeit von eventuellen Anpassungen der Sicherheitsbeiwerte (z. B. Eurocode) gegeben, da im Zuge einer stärker geregelten bzw. normierten Anwendung von Stampflehm in Zukunft sehr wahrscheinlich geringere Wandstärken realisierbar werden (vgl. S. 68). Zudem wird eine größere Anwendungsfreiheit, z. B. die Einplanung auch größerer Erosionstiefen, ermöglicht.

Auch bezüglich der Oberflächenqualität erscheint eine absolute Definition sinnvoll, da deren Wahrnehmung in der Regel unabhängig von der Wanddicke ist. Wie in Kap. 3 (vgl. S. 69) dargestellt, kann eine flächige Erosion von bis zu ca. 3 cm heute als akzeptiert, wenn nicht sogar von ästhetischem Wert gelten. Es bleibt anzunehmen, dass dies grundsätzlich auch für tiefere Erosionen (sowohl flächig, als auch ggf. lokal begrenzt) der Fall sein kann. Hier lässt sich jedoch eine allgemein gültig Grenze – also die Definition eines gegenwärtig als vertretbar empfundenen, maximalen Maßes – nur schwer aufstellen. Zum einen fehlen hinsichtlich der ästhetischen Wirkung tieferer Erosionen Untersuchungs- und Erfahrungswerte. Zum anderen unterliegt diese der subjektiven Wahrnehmung, und ist abhängig vom Grad der allgemeinen Akzeptanz der Erosion – welche wiederum, etwa in Hinblick auf ein wachsendes Vertrauens in die Leistungsfähigkeit des Baustoffs, veränderlich ist. Hierzu zählt vermutlich selbst die Schwelle zwischen der Wahrnehmung einer Erosionserscheinung als bewußt einkalkuliertem Gestaltungselement, und jener als reparaturbedürftigem Schadensfall (vgl. S. 68), sodass ein derzeit als kritisch bewertetes Maß der Erosion zukünftig durchaus als „normal“ empfunden werden könnte.

Darüber hinaus ist die Wahrnehmung der Erosion stark abhängig von der konkreten Anwendung, d. h. der Gesamtgestalt der jeweiligen Wand wie auch angrenzender Bauteile, und lässt sich kaum isoliert beurteilen.

Aus diesen Gründen erscheint die Definition einer klaren Grenze der Erosion in Bezug auf die Oberflächenqualität nicht nur schwierig, sondern auch wenig sinnvoll. Für den Rahmen der folgenden Untersuchungen soll nichts desto trotz eine grobe Maßgabe erfolgen. Um auch stärkere Erosionen in die Untersuchungen einbeziehen zu können, soll hier eine maximale Tiefe von 6 cm in Betracht kommen.

³ Da vertikale Leisten, wie bereits angedeutet, aufgrund ihrer Orientierung keinen Schutz vor ablaufendem Regenwasser, und nur in wenigen Fällen (bei großer Auskragung) Schutz vor seitlich auftreffendem Regenwasser bieten können, betrifft die indirekte Gestaltprägung primär horizontale Erosionsleisten.

5.1.3 Ökologischer Leitsatz

Eine besondere Maßgabe der Untersuchungen im Rahmen der Arbeit stellt der möglichst sparsame Einsatz klimaschädlicher Baustoffe wie Zement oder Kalk dar.

Zement ist einer der Baustoffe mit den höchsten CO₂-Emissionen. Die bei der Kalkherstellung erzeugten Emissionen, welche im Vergleich etwa die Hälfte betragen, sind ebenso nicht zu vernachlässigen.^{4,5} Hier wirkt sich jedoch positiv aus, dass das bei der Herstellung freigesetzte CO₂ während des Abbindevorgangs des Kalks wieder aufgenommen wird, die Bilanz (abgesehen von weiteren, bei der Herstellung anfallenden Emissionen) also ausgeglichen ist.

Im Vergleich mit einer Stabilisierung des Lehms ist die Verwendung von Zement oder Kalk zur Erstellung von Erosionsleisten weit positiver zu bewerten. Eine Stabilisierung führt nicht nur zu schlechteren bauphysikalischen Eigenschaften des Bauteils und einer wesentlich geringeren Rezyklierbarkeit des Lehms. Auch hinsichtlich der Menge an benötigten Bindemitteln schneidet sie im Vergleich schlecht ab. So bedeutet die Stabilisierung bei einer Mauerwerks-Schichthöhe von 50 cm und Verwendung einfacher Erosionsleisten einen signifikant (im Rechenbeispiel um den Faktor 20) höheren Zementverbrauch.⁶ Wie erläutert, ist sie zudem in vielen, wenn nicht den allermeisten Anwendungsfällen vermeidbar (vgl. S. 64).

Aber auch bei der Verwendung von Erosionsleisten ist die Begrenzung des Einsatzes von Zement und Kalk auf ein für den Gebrauch angemessenes Maß ein wichtiges Ziel, welches einen Unterschied bei den Umweltauswirkungen ausmachen kann. Erst die Beachtung dieser ökologischen Leitlinie ermöglicht eine ganzheitliche Beurteilung der Angemessenheit technisch-gestalterischer Lösungen.

4 vgl. z. B. Walker et al. 2005, S. 129

5 vgl. Ökobaudat o. D.

6 Rechenbeispiel:

Volumen Leiste (angenommen): 2 cm x 15 cm x 100 cm = 0,0030 m³; Zementverbrauch: 0,0030 m³ x 350 kg/m³ (Zementgehalt) = 1,05 kg.

Volumen Lehmstein: 99 cm x 49 cm x 36,5 cm = 0,1770 m³; Zementverbrauch: 0,1770 m³ x 130 kg/m³ (Zementgehalt) = 23,02 kg.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Lehmstein in seiner vollen Tiefe stabilisiert wird. Gegenüber einer Stabilisierung lediglich der vorderen 5 cm (welche technisch aufwendiger ist) beträgt die Reduktion noch immer das 3-fache.

Bei den Schichthöhen 25 und 12,5 cm ist der Unterschied aufgrund des geringeren Abstandes der Leisten kleiner.

5.2 Typologie

Aufbauend auf den zuvor definierten Anforderungen soll im Folgenden ein grundlegendes Ordnungssystem für Erosionsleisten etabliert werden, in welchem sich unterschiedliche Arten erfassen lassen. Wie oben (vgl. S. 134 f.) erläutert, steht diese Typologie in engem Zusammenhang mit den im folgenden Abschnitt behandelten Anwendungsstudien. Daher wird hier bereits auf einzelne Studien verwiesen.

5.2.1 Ordnungskriterien und -merkmale

Die hier entwickelte Typologie verwendet zwei Ordnungskriterien, anhand derer sich wesentliche Unterschiede zwischen Erosionsleisten beschreiben lassen.

Das erste Kriterium ist die *Wirkungsweise*, welche horizontale Erosionsleisten zum Schutz der Oberfläche – und im Zusammenhang damit auch zur indirekten Gestaltprägung – ausüben. Der Begriff der Wirkungsweise ist in Abgrenzung zur Funktionsweise gewählt, um dieser doppelten Aufgabe Rechnung zu tragen. Da durch verschiedene Wirkungsweisen sehr unterschiedliche Grade der Schutzwirkung, als auch unterschiedliche Beeinflussungen der Bauteilgestalt entstehen, stellt die Wirkungsweise im Kontext der Arbeit ein besonders relevantes Unterscheidungskriterium dar.

Beim zweiten Ordnungskriterium handelt es sich um die *Herstellungsweise* der Erosionsleiste. Im Zuge der in Kap. 4 gezeigten Untersuchungen wurde deutlich, dass diese gut zur technischen Differenzierung von Leistenelementen geeignet ist.

5.2.1.1 Wirkungsweise

Im Folgenden sollen drei grundlegende Wirkungsweisen definiert und erläutert werden, welche auf bewährte, konstruktive Techniken (vgl. Kap. 3, S. 76 ff.) zurückgehen, bzw. als Grundprinzipien aus diesen abstrahiert werden: das *Abhalten*, das *Ableiten*, sowie das *Abbremsen* des Wassers. Zu diesen Grundformen sind jeweils sekundäre Ordnungskriterien ableitbar, aus welchen sich Unterformen ergeben. Die Reihenfolge der Behandlung orientiert sich am angenommenen Grad ihrer Schutzwirkung.

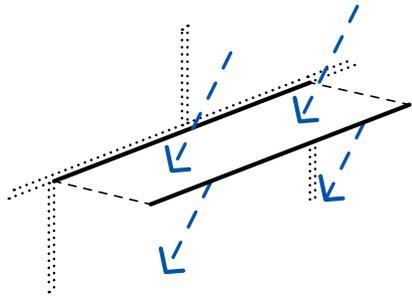


Abb. 5-6: Abhalten (Prinzipdarstellung)

Abhalten

Das Abhalten des Regenwassers von der Fassade ist ganz offensichtlich die wirksamste Schutzmaßnahme, da das Wasser hier erst gar nicht, oder nur in sehr geringem Maße, mit der Fassade in Kontakt kommt. Das Abhalten wird durch einen deutlichen Überstand der Leiste über die Wandoberfläche bewirkt. In der traditionellen Architektur macht sich u. a. die Raqaf-Technik (vgl. S. 71) diese Wirkungsweise zunutze. Analog zum klassischen, konstruktiven Feuchteschutz auf Ebene des Bauwerks – durch einen Dachüberstand, welcher einen wesentlichen Teil der darunter liegenden Wand vor Schlagregen schützt – werden durch die Leisten in den horizontalen Lagerfugen kleine „Vordächer“ ausgebildet, welche jeweils die darunter liegende Steinlage (eine Schichthöhe) schützen. In Abgrenzung zur Wirkungsweise des Abbremsens (s. u.) soll hier von Abhalten gesprochen werden, wenn mindestens 50% der Steinhöhe geschützt ist. Dabei soll die 60° - Regel (vgl. S. 63) maßgebend sein. Im Falle eines Überstandes, welcher eine volle Steinhöhe schützt, kann auf den Schutz der vertikalen Mauerwerksfugen durch Erosionsleisten verzichtet werden.

Ein kompletter Überstand muss jedoch nicht in allen Fällen gewährleistet sein. Das Abhalten des Wassers kann auch als Teil-Schutz gesehen werden, welcher ggf. mit anderen Maßnahmen kombiniert wird, oder aber, z. B. im Falle einer sehr geringen Windbeanspruchung der Fassade, bereits einen ausreichenden Schutz darstellt. Über das Maß des Überstandes der Leiste kann die Stärke des Schutzes, bzw. die Größe des geschützten Bereichs eingestellt werden.

Weiterhin lässt sich unterscheiden zwischen einer gleichförmigen und einer ungleichförmigen Wirkungsweise.

Abhalten, gleichförmig

Beim gleichförmigen Abhalten ist das Maß der Leistenüberstandes in Wandachse gleichbleibend, d. h. im Falle eines Überstandes, welcher eine komplette Steinhöhe schützt, trifft in der Regel kein Schlagregen auf die Fassade auf (Abb. 5-7, Abb. 5-9).

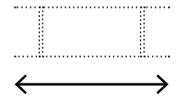


Abb. 5-7: Gleichförmigkeit

Abhalten, ungleichförmig

Beim ungleichförmigen Abhalten variiert die Stärke der Schutzwirkung entlang der Fassade, wodurch z. B. auf Sonderstellen im Mauerwerksgefüge eingegangen werden kann. So kann etwa über den vertikalen Stoßfugen ein größerer Überstand als in Steinmitte realisiert werden, um diese besonders zu schützen (Abb. 5-8,



Abb. 5-8: Ungleichförmigkeit



Abb. 5-9: Abhalten, gleichförmig (Prinzipdarstellung)

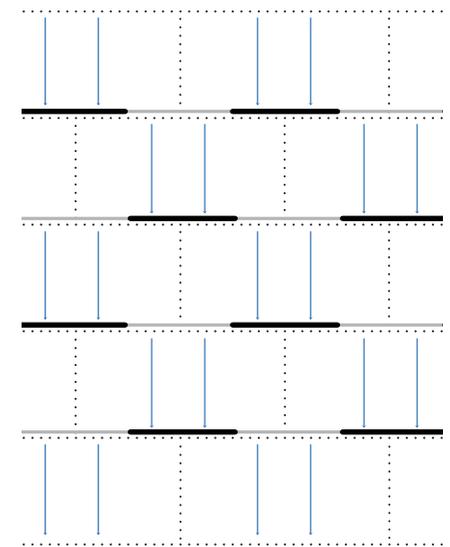


Abb. 5-10: Abhalten, ungleichförmig (Prinzipdarstellung)

Abb. 5-10⁷). Ebenso können gestalterische Ziele ein Grund für die Wahl einer Ungleichförmigkeit sein.

Auf die Fassade auftreffendes Regenwasser wird in der jeweils darunter liegenden Steinlage, über die hier weiter vorkragenden Leisten, zum Abtropfen gebracht (Abb. 5-10).

7 Die Breiten der blauen Pfeile, welche die Richtung des Wasserlaufs angeben, stehen jeweils im Verhältnis zur abzuleitenden Wassermenge in der jeweiligen Steinlage.

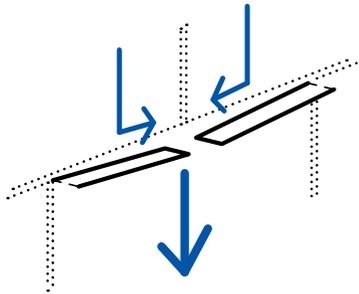


Abb. 5-11: Ableiten (Prinzipdarstellung)

Ableiten

Die Wirkungsweise des Ableitens geht zurück auf Drainage-techniken im Bereich des Landschaftsbaus (vgl. Kap. 3, S. 86), welche durch kontrolliertes Wegführen des Oberflächenwassers über wasserbeständige, rinnenartige Bauteile die Erosion der Oberfläche verringern.

Übertragen auf die vertikale Mauerwerksoberfläche lässt sich das Prinzip des Ableitens in drei Sub-Prinzipien untergliedern. Bei jedem dieser findet eine Bündelung des auf die Oberfläche aufgetroffenen, vertikal abfließenden Regenwassers statt. Je Steinlage wird das Wasser hier durch die Erosionsleisten in Wandachse umgeleitet, und an definierten Stellen nach unten weitergeleitet.

Ableiten über Fugen

Bei dieser Unterform wird das Wasser zu den Stoßfugen geleitet und hier kanalisiert nach unten geführt. Auf diese Weise entsteht eine Art Drainage der Oberfläche. Horizontale und vertikale Erosionsleisten bilden ein in die Mauerwerksfugen integriertes Netz



Abb. 5-12: Ableiten über Fugen

von Entwässerungskanälen, welches das Wasser in Richtung Wandsockel leitet (Abb. 5-12, Abb. 5-13).

Das Ableiten über die Fugen vermindert die Erosionsbeanspruchung vor allem der unteren Wandbereiche, da jeder Mauerstein hier nur das auf ihn auftreffende Regenwasser ableitet, nicht jedoch das auf darüber liegende Steinschichten auftreffende Wasser. Da das gesamte auf die Fassade auftreffende Wasser hier linear abgeleitet wird, und zudem die Menge des Wassers zum Sockel hin kontinuierlich zunimmt, müssen in den Stoßfugen gerade der unteren Wandbereiche beachtliche Wassermengen geführt werden (Abb. 5-13). Noch dazu entstehen aufgrund des Fugenversatzes längere Ablaufwege mit deutlich mehr Richtungswechseln als etwa beim Ableiten über die Fläche (s. u.), was im Vergleich längere Auflaufzeiten und damit größere abzuleitende Wassermengen pro Zeiteinheit zur Folge hat. Bei der Dimensionierung der Erosionsleisten ist dies zu berücksichtigen.

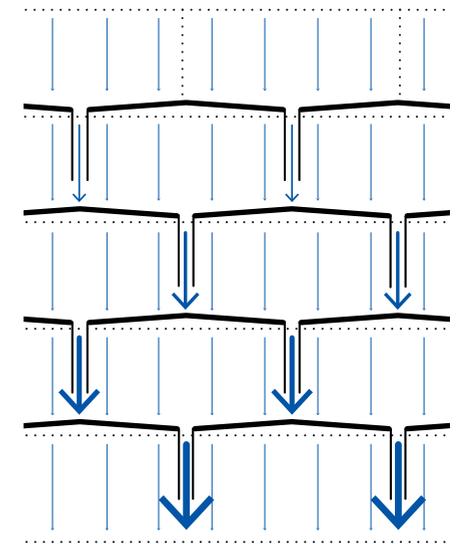


Abb. 5-13: Ableiten über Fugen (Prinzipdarstellung)

Ableiten über Regelsteine

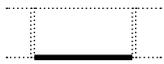


Abb. 5-14:
Ableiten über Regelsteine

Bei dieser Unterform wird das Wasser in vertikaler Richtung über die Lehmsteine abgeleitet, wodurch eine erhöhte Auswaschung bzw. Rinnenbildung auf der Oberfläche der betroffenen Steine entsteht (Abb. 5-14, Abb. 5-16). Die im Bereich der gebündelten Wasserführung entstehende Erosion muss möglichst sorgfältig kalkuliert werden, und ist durch entsprechende Überdimensionierung der Wand zu kompensieren.

Ableiten über Sondersteine

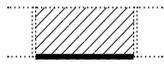


Abb. 5-15:
Ableiten über Sondersteine

Beim Ableiten über Sondersteine handelt es sich um eine Abwandlung des Ableitens über Regelsteine (s. o.), bei der die vertikale Führung des Wassers über stabilisierte Lehmsteine (vgl. Kap. 3, S. 63) erfolgt, welche in deutlich geringerem Maße erodieren. Je weniger Sondersteine verwendet werden, d. h. je weiter das Wasser in horizontaler Richtung umgeleitet wird, desto größer ist die zu führende Wassermenge je Steinlage (Abb. 5-15, Abb. 5-17).

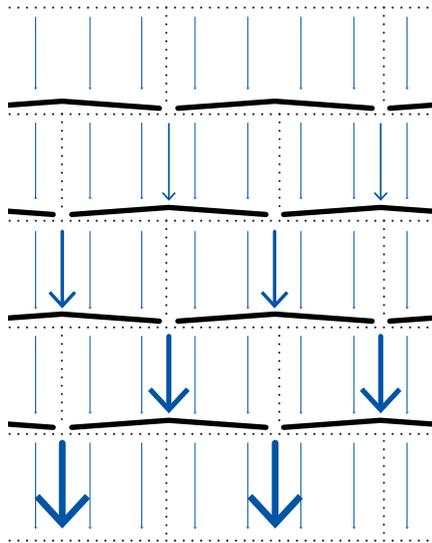


Abb. 5-16: Ableiten über Regelsteine
(Prinzipdarstellung)

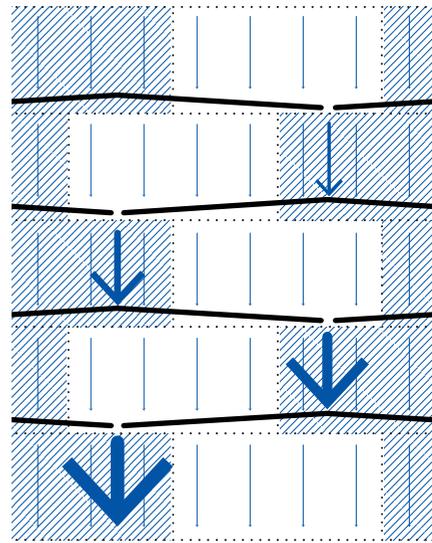


Abb. 5-17: Ableiten über Sondersteine
(Prinzipdarstellung)

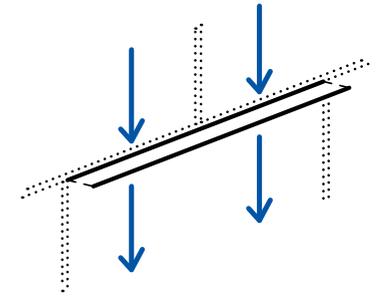


Abb. 5-18: Abbremsen (Prinzipdarstellung)

Abbremsen

Bei der Wirkungsweise des Abbremsens bildet die horizontale, gering vorkragende Erosionsleiste eine Barriere, welche den vertikalen Wasserabfluss auf der Oberfläche verlangsamt, und hierdurch das Maß der Erosion begrenzt. Die Grundzüge dieser Funktionsweise wurden im Rahmen der Besprechung der Erosionsbremse in Kap. 3 (vgl. S. 73) erläutert, gehen aber ebenso auf traditionelle Techniken (vgl. S. 76 ff.) zurück.

Je nach Wassermenge und Ausbildung der Leiste fließt das Wasser um diese herum oder tropft an der Vorderkante ab. Da bei Schlagregen immer Wind in Richtung der Fassade eine Rolle spielt, wird für den Fall des Abtropfens davon ausgegangen, dass das Wasser aufgrund des geringen Leistenüberstandes zurück an die Wandoberfläche gedrückt wird. Auch hierbei soll die erwähnte 60°-Regel gelten.

Sowohl durch das Umströmen der Leiste, als auch das Abtropfen von deren Vorderkante verringert sich die Geschwindigkeit des Wassers. Beim Umströmen geschieht dies aufgrund der Richtungsänderungen, zu der das Wasser gezwungen wird. Beim Abtropfen ist die Situation komplexer und hängt von der Menge des Wassers sowie seiner Fallhöhe von der Leiste zur Wandoberfläche ab, welche umso größer ist, je geringer der Winddruck ausfällt. Die Fallhöhe entspricht jedoch maximal dem vertikalen Abstand der Leisten, sodass davon ausgegangen werden kann, dass gegenüber dem ungebremsten Ablauf des Wassers über eine Geschosshöhe oder mehr eine deutliche Begrenzung der Geschwindigkeit erreicht wird.

Bei der Wirkungsweise des Abbremsens wächst die abzu-

leitende Wassermenge vom Dachrand zum Wandsockel hin kontinuierlich an (Abb. 5-21). Während die oberste Steinlage nur das auf sie selbst auftreffende Regenwasser ableitet, leitet die unterste Steinlage zudem das auf alle über ihr befindlichen Steinlagen auftreffende Wasser ab.

Auch beim Abbremsen des Wasser kann zwischen einer gleichförmigen und ungleichförmigen Wirkungsweise unterschieden werden (vgl. Kap. 4, Abschnitt 4.2).

Abbremsen, gleichförmig

Beim gleichförmigen Abbremsen wird ablaufendes Regenwasser entlang der Wand gleich stark abgebremst (Abb. 5-19, Abb. 5-21). Dies ist der Standard bei der heutigen Verwendung von Erosionsbremsen in monolithischen (bzw. aus Großblöcken gefügten) Stampflehmwänden.

Abbremsen, ungleichförmig

Auch ist es möglich, die Erosionsleisten so auszubilden – z. B. durch eine Variation ihres Überstandes – dass das Wasser in Wandachse ungleichförmig stark abgebremst wird, was zu Bereichen mit unterschiedlicher Erosionsbeanspruchung führt. Dies kann etwa sinnvoll sein, um den Einsatz von Zement bzw. Kalk zu minimieren, und hierfür z. B. einen Leistenüberstand nur über den Stoßfugen (ähnlich wie bei Wirkungsweise Hu, vgl. S. 147) herzustellen. Auch kann auf diese Weise eine starke indirekte Gestaltprägung erfolgen.

Hybridformen

Über obige Grundformen von Wirkweisen hinaus lassen sich auch hybride Wirkweisen beschreiben. Eine Hybridität liegt vor, wenn keine eindeutige Zuordnung zu einer Wirkungsweise möglich ist, es sich also um eine Mischform handelt. Ein Beispiel für eine solche ist in der Anwendungsstudie auf S. 260 gezeigt.

Elementbezug

Bei einer ungleichförmigen Wirkungsweise, als auch den Wirkweisen des Ableitens, kann zudem unterschieden werden, ob ein Elementbezug vorliegt oder nicht. Die Wirkungsweise kann sich jeweils entweder auf die Länge bzw. Höhe des Mauersteines, also auf ein Modul beziehen, oder aber sich über mehrere Module

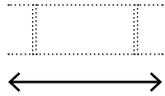


Abb. 5-19: Gleichförmigkeit



Abb. 5-20: Ungleichförmigkeit

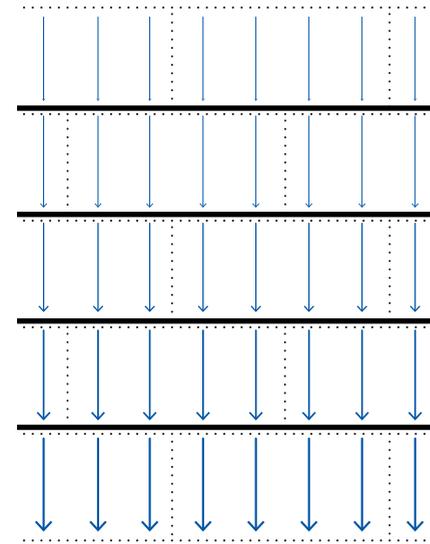


Abb. 5-21: Abbremsen, gleichförmig (Prinzipdarstellung)

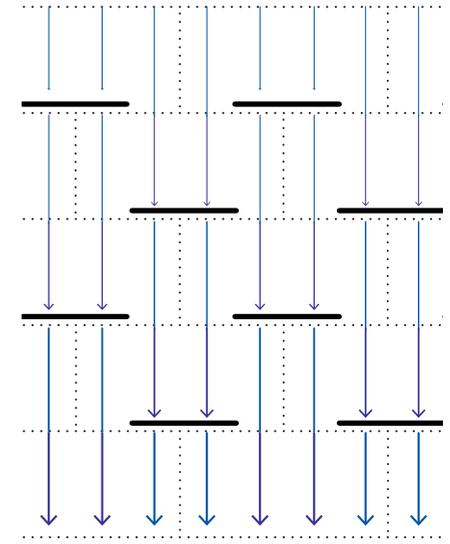


Abb. 5-22: Abbremsen, ungleichförmig (Prinzipdarstellung)

– in horizontaler als auch vertikaler Richtung – hinweg erstrecken.

Beim Ableiten über die Fugen etwa lässt sich der Abstand der horizontalen und/oder vertikalen Leisten auch auf ein Vielfaches der Steinbreite bzw. Steinhöhe vergrößern.⁸

Auch beim Ableiten über Sondersteine kann durch ein hohes Verhältnis nicht stabilisierter zu stabilisierter Steine eine Optimierung erreicht werden. Dem gegenüber stehen jedoch deutlich größere Leistenquerschnitte, da das Wasser über eine größere Distanz im Gefälle geleitet werden muss.

Der Elementbezug betrifft somit das Thema der Effizienz der Wirkungsweise, und hat darüber hinaus großen Einfluss auf die Bauteilgestalt (direkte als auch indirekte Gestaltprägung). Zugunsten der Übersichtlichkeit der typologischen Ordnung wird der Elementbezug jedoch nicht als zusätzliches Ordnungskriterium aufgenommen.

⁸ Mit der Vergrößerung des Abstandes wachsen jedoch auch die erforderlichen Rinnenquerschnitte proportional an, und das Netzwerk der Ableitungsrinnen wird zu einem zunehmend eigenständigen Subsystem des Wandbauteils. Zudem muss dem Schutz der übrigen Fugen durch weitere Maßnahmen Sorgen getragen werden.

5.2.1.2 Herstellungsweise

Das Kriterium der Herstellungsweise betrifft zum einen die Materialität der Erosionsleiste, zum anderen die Art ihrer Integration in das Wandbauteil.

Was die Materialität betrifft, sollen hier lediglich die mineralischen Werkstoffe Kalk- (bzw. Trasskalk-) Mörtel und Feinbeton in Betracht kommen. Wie in Kap. 3 erläutert, zeigen diese ein gutes baustoffliches Zusammenspiel mit Lehm.

Erosionsleisten aus diesen Werkstoffen können entweder als Mörtelleisten, oder aber unter Verwendung vorgefertigter Elemente erstellt werden. Die Anwendbarkeit dieser zwei Herstellungsweisen hängt eng mit der Art der Integration der Leiste in das Mauerwerksgefüge zusammen. Sowohl Mörtelleisten als auch vorgefertigte Leisten können bereits während der Herstellung des Lehmsteins mit diesem verbunden (also in den Stein integriert), oder aber im Zuge der Erstellung des Wandbauteils, also beim Vermauern der Lehmsteine, integriert werden.

Mörtelleiste

Die einfachste Art der Herstellung einer Mörtelleiste ist die Verwendung eines Kalk- (bzw. Trass-Kalk-) Mörtels zum Vermauern der Lehmsteine. Der Vorteil dieser Variante ist die große Einfachheit und Effizienz in der Herstellung. Auch wird hier die erosionsanfällige Lehmfuge komplett eliminiert.

Wenngleich in dieser Arbeit nicht hinreichend untersucht und belegt, wird angenommen, dass sich Kalkmörtel grundsätzlich als Mauer- und Fugenmörtel in Stampflehm-Mauerwerk eignet. Die Verwendung von Kalkmörtel-Lagen im traditionellen als auch zeitgenössischen Stampflehm-Bau wurde bereits in Kap. 3 (vgl. S. 74, S. 76 ff.) angesprochen. Auch laut Röhlen und Ziegert ist eine Vermauerung von Lehmsteinen mittels Kalkmörtel möglich.⁹ Weitere Forschungen legen nahe, dass dieser eine wesentlich höhere Bindekraft mit Lehmbauteilen eingehen kann als Lehmmörtel.¹⁰ Der Einsatz von Kalkmörtel ist überdies nur im fassadennahen Wandbereich notwendig. Im rückwärtigen Bereich kann normaler Lehm-Fugenmörtel verwendet, und hierdurch auch der Einsatz von Kalk minimal gehalten werden.

Prinzipiell kann eine Mörtelleiste auch vorab mit dem Lehmstein verbunden werden. Hierzu kann bei der Herstellung des Lehmsteins eine Lage Kalkmörtel an der späteren Vorderseite des Steines in die Schalung eingebracht, und mit dem Lehm verstampft werden. Eine Mörtelleiste am Steinrand bedeutet jedoch, dass der Stein nicht direkt ausgeschalt werden kann, da der Mörtel zu diesem Zeitpunkt noch keine ausreichende Festigkeit aufweist. Daher eignet sich diese Variante nicht zur Erstellung einer regulären Erosionsleiste, welche die horizontale Mauerwerksfuge schützt. Sie kann jedoch im Falle hoher Elemente ergänzend in Betracht kommen. Bei einer Schichthöhe von mehr als 50 cm kann es sinnvoll sein, zur Verkürzung des Abstandes zwischen den Leisten eine zusätzliche Leiste in der Mitte des Elements vorzusehen. Hier bietet sich eine Mörtelleiste an, da sie einfacher in den Stampfprozess integrierbar ist als eine vorgefertigte Leiste. Diese Variante wird hier jedoch nicht näher beschrieben, da im Rahmen der Untersuchungen keine Mauerwerks-Schichthöhen größer als 50 cm behandelt werden.¹¹

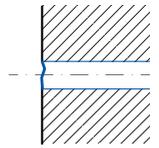


Abb. 5-23:
Mörtelleiste in Fuge
(schematische Darstellung)

⁹ vgl. Röhlen, Ziegert 2014, S. 170

¹⁰ vgl. Lawrence, Heath, Walker 2008

¹¹ Für eine technische Beschreibung von im Lehmelement integrierten Erosionsleisten aus Trasskalk siehe z. B. Kapfinger, Sauer 2015, S. 72

Im Vergleich mit vorgefertigten Leisten zeichnen sich Mörtelleisten durch eine sehr einfache und effiziente Herstellung aus, da die separate Vorfertigung entfällt und die Leiste zusammen mit dem Lehmstein, bzw. während der Vermauerung, geformt wird. Ein entscheidender Nachteil dieser Herstellungsweise ist jedoch, dass unter den verschiedenen Wirkungsweisen nur das Abbremsen des Wassers umsetzbar ist, und hierbei zudem kein Leistenüberstand und somit keine Tropfkante herstellbar sind. Aufgrund dessen fällt der erreichbare Grad der Schutzwirkung deutlich geringer als bei Verwendung vorgefertigter Leisten (s. u.) aus.

Angesichts der viel bezeugten Langlebigkeit traditionell verwendeter Kalklagen (vgl. S. 76 ff.) wird davon ausgegangen, dass Leisten aus Kalkmörtel auch im heutigen Gebrauchskontext eine grundsätzlich ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen.

Vorgefertigte Leiste

Durch die Verwendung vorgefertigter Leisten wird eine weitaus größere Kontrolle über die geometrische Ausbildung, die Lage, als auch die Fügung der Leiste im Mauerwerk erreicht, welche sowohl in funktionaler als auch gestalterischer Hinsicht von Bedeutung sein kann.

Der Hauptvorteil gegenüber Mörtelleisten besteht darin, dass vorgefertigte Leisten mit Überstand über die Wandoberfläche ausgebildet werden können. Auf diese Weise kann die Leiste ihre Funktion bereits ab Baufertigstellung aufnehmen, d. h. sie muss nicht erst durch die einsetzende Erosion freigelegt werden. Durch den Überstand ergibt sich zudem die Möglichkeit der Integration einer Tropfkante an der Leistenvorderkante, wodurch verhindert wird, dass Wasser an der Unterseite der Leiste zurück zur Wandoberfläche läuft, und hier insbesondere die horizontale Mauerwerksfuge beansprucht.¹²

Darüber hinaus sind beispielsweise Gefälle auf der Oberfläche der Leiste herstellbar, durch welche der Wasserablauf kontrolliert bzw. gesteuert werden kann (vgl. Abschnitt 5.2.1.1, Wirkungsweisen). Hierdurch lassen sich die Grade der möglichen Schutzwirkung und der indirekten Gestaltprägung im Vergleich mit Mörtelleisten wesentlich erhöhen.

Wegen der geringeren Rauheit und Porosität der Oberfläche (aufgrund einer fließfähigeren Materialkonsistenz bei der Herstellung)

¹² Grundsätzlich können durch eine solche Umströmung der Leiste Turbulenzen im Wasserablauf entstehen, welche die Erosion verstärken (vgl. auch S. 73).

kann ferner vermutet werden, dass vorgefertigte Leisten eine etwas größere Dauerhaftigkeit als Mörtelleisten aufweisen. Bei Leisten aus Feinbeton kann von einer durchschnittlichen Lebensdauer von bis zu 80 Jahren ausgegangen werden.¹³ Diese kann zudem durch hohe Oberflächenqualitäten sowie Versiegelungen weiter erhöht werden, sodass im Laufe einer anzusetzenden Gebäude-Lebensdauer von 100 Jahren Leisten im Regelfall nicht zu erneuern wären.

Vorgefertigte Leisten können grundsätzlich auf zwei verschiedene Weisen in das Wandbauteil integriert werden.

Leiste in Fuge

Bei dieser Variante wird die Erosionsleiste während des Vermauerns mit den Lehmsteinen gefügt. Aufgrund der Trennung von Leiste und Lehmstein bietet sie einen großen Anwendungsspielraum. Die Leisten sind nicht zwingend an die Abmessungen der Steine gebunden, und ihre Lage im Mauerwerksgefüge, sogar die Lage der Mauersteine zueinander, kann, falls gewünscht, innerhalb des Wandbauteils variiert werden (→ z. B. Studie Hg/Bg-Vf, S. 260). Die möglichen gestalterischen Wirkungen bei dieser Art der Herstellung und Fügung sind folglich äußerst vielfältig. Sie stehen zudem in engem Zusammenhang mit der Wirkungsweise der jeweiligen Leiste (vgl. Abschnitt 5.2.1.1).

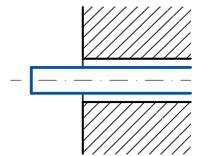


Abb. 5-24:
Vorgefertigte Leiste in Fuge
(schematische Darstellung)

Verbund mit Lehmstein

Diese Variante entspricht grundsätzlich der in Kap. 4, Abschnitt 4.3 (vgl. S. 105) beschriebenen Methode. Hierbei wird die vorgefertigte Leiste bei der Steinherstellung zuunterst in die Schalung eingelegt, und mit der ersten Lehmschicht verstampft.

Der Vorteil gegenüber der Fügung während des Vermauerns ist ein schnellerer Aufbauprozess, da aufgrund des höheren Grades der Vorfertigung nur ein Element vermauert wird und die Dopplung der Nassfugen (unter- sowie oberhalb der Leiste) entfällt. Auch weist sie aufgrund des sehr guten Verbundes zwischen Leiste und Lehmstein eine hohe Dauerhaftigkeit auf. Durch die Lage am unteren Steinrand, sowie die Kombination von Überstand und Tropfkante, werden die horizontalen Mauerwerksfuge zudem optimal geschützt.

Ein Nachteil des Verbundes mit dem Stein ist jedoch, dass hier nur geringe Leistenüberstände möglich sind, da durch große-

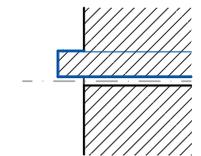


Abb. 5-25:
Vorgefertigte Leiste im Verbund
mit Lehmstein
(schematische Darstellung)

¹³ vgl. Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e. V., 2008

re Überstände deutliche Nachteile in der Handhabung bei Transport und Vermauerung der Steine entstehen. Aufgrund dessen, sowie der Bindung des Leistenelements an den Mauerstein, sind mit dieser Variante weniger Wirkungsweisen als durch die Fügung während des Vermauerns, und nur ein einfacher Erosionsschutz umsetzbar. Zudem ist bei einem Verbund die Herstellung der Sondersteine an den Gebäudeecken (vor allem an Außenecken) deutlich komplizierter als bei einer Trennung von Leiste und Stein.

Ein weiterer Nachteil ist die entstehende Lücke am Stoßpunkt der Leisten, welche nachträglich geschlossen werden muss, damit es nicht zu einer unbeabsichtigten Bündelung des ablaufenden Wassers, und hierdurch zur kritischen Erosion der darunterliegenden Stoßfuge kommt. Zum Schließen der Lücke am Leistenstoßpunkt eignet sich die meist ohnehin notwendige, vertikale Erosionsleiste. An diesem neuralgischen Punkt ist die Fügung jedoch besonders sorgsam auszuführen. Falls keine Stoßfugenleisten verwendet werden, kann die Lücke grundsätzlich auch mittels separater Brückenteile oder einfacher Vermörtelung geschlossen werden, wengleich sich hier die Frage der Dauerhaftigkeit stellt. In jedem Fall ist ein zusätzlicher Aufwand einzukalkulieren, welcher die Bauzeitverkürzung ggf. relativiert.

Auch was die Herstellung des Lehmsteins angeht – welche jedoch in Vorfertigung abseits der Baustelle erfolgen kann – ist der Verbund mit dem Lehmstein etwas aufwändiger und fehleranfälliger als die Fügung während des Vermauerns (vgl. S. 118).

Hybridformen

Grundsätzlich sind auch Mischformen der obigen Herstellungsweisen möglich. Hiermit sind Anwendungsvarianten gemeint, bei denen sowohl eine Leiste in der Fuge, als auch eine Leiste am Stein verwendet wird. Dabei kommt vor allem die Ergänzung einer vorgefertigten Leiste in der Fuge um eine Mörtelleiste welche die oberhalb befindliche Fuge schützt, in Betracht (→ Studie Ls-Vf/M, S. 218). Durch diese Kombination kann ein besonders starker Fugenschutz erreicht werden. Hybridformen ermöglichen also eine gewisse Flexibilität in der Reaktion auf besondere Beanspruchungssituationen.

Vertikale Erosionsleisten

Horizontale Leisten jeder der vier besprochenen Arten sollten in den meisten Fällen durch vertikale Leisten ergänzt werden.

Dabei kommt hauptsächlich die Fügung der Leiste während des Vermauerns infrage, da die Integration in den Stein aufgrund der Stampfrichtung problematisch ist.

Die einfachste und effizienteste Variante ist auch hier die Verwendung von Kalk-Mauermörtel. Eine Abwandlung dieser Variante ist die Verwendung von Lehmmörtel, welcher durch einen geringen Anteil an Kalk oder Zement stabilisiert wurde. Hierdurch kann in Fällen geringer Schlagregen-Exposition ein ausreichender Schutz erwirkt werden.

Für einen stärkeren Schutz, und/oder zur Verfolgung besonderer gestalterischer Ziele, können vorgefertigte Leisten verwendet werden.

5.2.2 Typenbildung

Durch die Zuordnung der im letzten Abschnitt behandelten Ordnungskriterien zueinander, d. h. die Bestimmung möglicher Anwendungskombinationen von Wirkungs- und Herstellungsweisen, lassen sich 12 unterschiedliche Typen von Erosionsleisten herausbilden, welche in Tab. 5-3 aufgezeigt sind.¹⁴

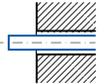
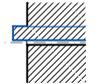
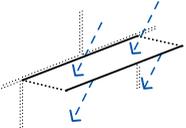
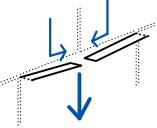
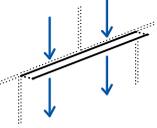
Die Bezeichnung des jeweiligen Typus wird durch die Kombination der Kurzbezeichnungen der Ordnungsmerkmale (vgl. Abb. 5-26) gebildet. Ein nicht belegtes Feld bedeutet, dass die entsprechende Kombination nicht umsetzbar oder ungeeignet ist. So ist etwa das Abhalten, aufgrund des notwendigen Leistenüberstandes, weder mittels einer Mörtelleiste (M), noch eines Leistenverbundes (Vv) herstellbar. Auch bei den Wirkungsweisen des Ableitens bestehen Einschränkungen hinsichtlich der Herstellungsweise.¹⁵ In der Aufstellung der Typen werden somit auch Zusammenhänge und Ab-

- 14 Wie das Kriterium der Wirkungsweise, so bezieht sich auch die Definition der Typen primär auf horizontale Leisten.
- 15 Das Ableiten über die Fugen (Lf) ist nicht durch einen Verbund der Leiste (Vv) herstellbar, da auf diese Weise ein seitlicher Überstand der Leiste, welcher für eine sichere Überleitung des Wassers von der horizontalen zur vertikalen Leiste notwendig ist, nur schwer realisiert werden kann. Ähnlich verhält es sich beim Ableiten über Sondersteine (Ls), wo eine Überleitung des Wassers zum Sonderstein in ausreichendem seitlichen Abstand sichergestellt sein muss. Das Ableiten über Regelsteine ist prinzipiell mittels der Herstellungsweise Vv realisierbar, allerdings erfordern die notwendigen Rinnenquerschnitte in den allermeisten Fällen eine Fügung der Leiste während des Vermauerns (Vf).

Kürzel Wirkungsweise – Kürzel Herstellungsweise

Hg:	Abhalten – gleichförmig	M:	Mörtelleiste
Hu:	Abhalten – ungleichförmig	Vf:	Vorgefertigte Leiste – in Fuge
Bg:	Abbremsen – gleichförmig	Vv:	Vorgefertigte Leiste – Verbund
Bu:	Abbremsen – ungleichförmig		
Lf:	Ableiten – über Fugen		
Lr:	Ableiten – über Regelsteine		
Ls:	Ableiten – über Sondersteine		

Abb. 5-26: Benennungsschema Typen

Herstellungsweise		Mörtelleiste (M)	vorgefertigte Leiste in Fuge (Vf)	Verbund (Vv)
Wirkungsweise				
Abhalten 	gleichförmig (Hg) 		Hg-Vf	
	ungleichförmig (Hu) 		Hu-Vf	
Ableiten 	Fugen (Lf) 		Lf-Vf	
	Regelsteine (Lr) 		Lr-Vf	Lr-Vv
	Sondersteine (Ls) 		Ls-Vf	
Abbremsen 	gleichförmig (Bg) 	Bg-M	Bg-Vf	Bg-Vv
	ungleichförmig (Bu) 	Bu-M	Bu-Vf	Bu-Vv

Tab. 5-3: Übersicht Typen

hängigkeiten zwischen den Ordnungskriterien deutlich.

Ist eine Wirkungsweise sowohl mittels der Herstellungsweise Vf, als auch der Herstellungsweise Vv umsetzbar – sodass einander sehr ähnliche Typen entstehen – so wird darüber hinaus unterschieden zwischen primärer und sekundärer Eignung (Typenbezeichnung in fett bzw. dünn). So zeigt sich zur Umsetzung der Wirkungsweisen Lr, Bg und Bu in Regel-Anwendungsfällen die Herstellungsweise Vf deutlich besser geeignet als Herstellungsweise Vv.

Hybridformen sowie Kombinationen unterschiedlicher Typen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Beispiele für Hybridformen werden in den Anwendungsstudien (ab S. 186) gegeben.

Das Gerüst der Typologie stellt kein abgeschlossenes System dar, sondern versteht sich als Bezugsmatrix, welche fortschreibbar ist und somit auch als Grundlage weiterführender Untersuchungen dienen kann.

Anwendbarkeit auf Schichthöhen

In Tab. 5-4 ist aufgezeigt, bei welchen Mauerwerks-Schichthöhen die verschiedenen Leistentypen anwendbar sind. Die Symbole + und o stehen dabei für eine geeignete bzw. bedingt geeignete Anwendung.

Ersichtlich wird hier, dass umso mehr Typen sinnvoll umsetzbar sind, je größer das Steinformat ist. Ein größeres Steinformat bietet mehr Möglichkeiten hinsichtlich der Herstellungsweise der Leisten, als auch der Umsetzung von Wirkungsweisen. Während sich die Mörtelleiste (Typen Bg-M und Bu-M) als einzige Herstellungsweise auch für den Einsatz bei der Schichthöhe 12,5 cm uneingeschränkt eignet, bedingt eine ökonomische Anwendung der übrigen Typen bei dieser Schichthöhe, dass mehrere Steinlagen zusammengenommen geschützt werden, d. h. Leisten nur in jeder zweiten, dritten oder vierten Lagerfuge angeordnet werden (Wirkungsweise ohne Elementbezug).

Für die Typen Lf-Vf bis Ls-Vf erscheint die Schichthöhe 12,5 cm ungeeignet, da die Größe der Steinoberflächen, sowie der Fugenabstand, in einem ungünstigen Verhältnis zu den abzuleitenden Wassermengen bzw. erforderlichen Leistenquerschnitten stehen. Auch ist hier der Erstellungsaufwand unverhältnismäßig hoch.

Typ	↑ 12,5 ↓	↑ 25 ↓	↑ 50 ↓
	Hg-Vf	o	+
Hu-Vf	o	+	+
Lf-Vf		o	+
Lr-Vf		o	+
Lr-Vf		o	+
Ls-Vf		o	+
Bg-M	+	+	+
Bg-Vf	o	+	+
Bg-Vv	o	+	+
Bu-M	+	+	+
Bu-Vf	o	+	+
Bu-Vv	o	+	+

Tab. 5-4: Übersicht Anwendbarkeit Typen auf Mauerwerks-Schichthöhen

5.3 Anwendungsstudien

In Ergänzung der Entwicklung der Typologie (Abschnitt 5.2) steht in diesem Abschnitt die konkrete Anwendung von Erosionsleisten im Fokus. Dabei werden in zeichnerischen Studien exemplarische Ausgestaltungen der behandelten Typen vorgenommen, und hierdurch deren direkte als auch indirekte (durch den Erosionsprozess erzeugte) Auswirkungen auf die Bauteilgestalt untersucht. Das Ergebnis dieser Auseinandersetzung ist ein Katalog von Anwendungsstudien, anhand derer Art und Maß der Schutzwirkung, als auch die durch die Typen erzeugten, charakteristischen Gestaltungsmerkmale veranschaulicht werden.

Maßgebend für die Ausgestaltung der Leistentypen im Rahmen der Studien sind zunächst deren in Abschnitt 5.2 beschriebene, jeweilige Merkmale. Aufbauend hierauf werden in Abschnitt 5.3.2 (s. u.) Ansätze zur Detaillierung und Integration der Leisten in das Wandbauteil erarbeitet. Durch diese werden die Grundzüge der Typen beschrieben. Für die weitere Ausformung spielen zudem Parameter wie das Überstandsmaß oder der Elementbezug der Wirkungsweise (vgl. S. 152) eine Rolle. Hier wird jeweils ein geeignetes Standard-Maß, bzw. die naheliegendste Variante für den entsprechenden Typ gezeigt.

Ebenso verbleibt Raum zur weiteren entwurflichen Ausgestaltung. Diesem kommt hier besondere Bedeutung zu, da durch den Entwurfsprozess – welcher stets die Synthese verschiedener, mitunter widerstreitender Anforderungen zum Ziel hat – eine Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeit funktionaler und gestalterischer Aspekte des Gebrauchs stattfindet. Zum Zweck einer Regelmäßigkeit der Untersuchungen werden in den Studien lediglich Abwandlungen der unten (Abschnitt 5.3.2) gezeigten Standard-Querschnitte für die jeweiligen Typen gezeigt. Dabei gilt die Zielvorgabe einfacher und vergleichbarer Lösungen. So werden z. B. alle ungleichförmigen Wirkungsweisen durch einen wellenlinienförmigen Verlauf der Leistenvorderkante umgesetzt. Als Standard für vertikale Erosionsleisten werden Mörtelleisten gezeigt.

Was das Zusammenspiel horizontaler und vertikaler Erosionsleisten angeht, vgl. auch Abschnitt 5.1.2.1, S. 139.

Grundlagen für den zeichnerischen Teil der Studien (ab S. 188) wurden im Rahmen von Seminaren für Studierende des Masterstudiengangs Architektur an der RWTH Aachen erarbeitet.

5.3.1 Betrachtungsrahmen

Die Anwendungsstudien sind am Beispiel einer exemplarischen, zweigeschossigen Gebäudeaußenwand an einem fiktiven Standort in Deutschland erstellt. Den Kern der Studien bilden Fassadenansichten, welche durch horizontale und vertikale Schnittdarstellungen ergänzt werden (vgl. Abb. 5-27, S. 166). Je Studie werden sowohl der Zustand bei Baufertigstellung (Zustand 1), sowie der angenommenen Zustand in einem fortgeschrittenen Stadium des Erosionsprozesses (nach einigen Jahren, Zustand 2) dargestellt.

Für die Darstellung von Zustand 2 wird eine Abschätzung des Maßes und der Verteilung der Erosion auf der Oberfläche vorgenommen. Aufgrund der zugrundeliegenden Prognosen kann dieser Teil der Studien daher nur eine grobe Annäherung an die Realität darstellen, und hat einen eher qualitativen als quantitativen Anspruch.

Bezüglich des Anwendungskontextes werden verschiedene Annahmen getroffen. Was Standortfaktoren betrifft, so wird von einer mittleren Schlagregenbeanspruchung im Sinne der in Kap. 3 (vgl. S. 57 ff.) erläuterten Regelwerke ausgegangen, wobei die untersuchte Wandfläche der vorherrschenden Windrichtung zugewandt ist (Wetterseite). Einer vereinfachten Anschauung halber wird angenommen, dass sie orthogonal zu dieser ausgerichtet ist bzw. eine gleich hohe Beanspruchung von beiden Seiten (durch drehende Winde) besteht.

Bezüglich der Wandkonstruktion wird für eine gute Vergleichbarkeit der Beispiele primär das Elementformat 99 x 49 x 36,5 cm (Schichthöhe 50 cm), sowie ein Überbindemaß von ½ Steinbreite untersucht. Wie in Kap. 3 erläutert, zeigt dieses Format das größte Anwendungspotential. Auch sind die meisten der untersuchten Wirkungsweisen bei diesem anwendbar (vgl. Tab. 5-4, S. 163). Da hier Erosionstiefen von bis zu 6 cm betrachtet werden, wird von einem in statischer Hinsicht ausreichenden Wandquerschnitt von 30 cm ausgegangen.

In den Ansichtszeichnungen werden zwei verschiedene Wandausschnitte behandelt (vgl. Abb. 5-27). Ein ca. 8 m² großer Bereich in Wandmitte wird im Maßstab 1:20, sowohl in Zustand 1 als auch Zustand 2 gezeigt. Zustand 2 wird zudem anhand eines größeren Ausschnitts im Maßstab 1:50 dargestellt, welcher den Wandsockel vereinfacht mit abbildet. Nicht dargestellt werden hier die oberste Steinlage sowie der Dachrand, da diese je Studie entwurfliche

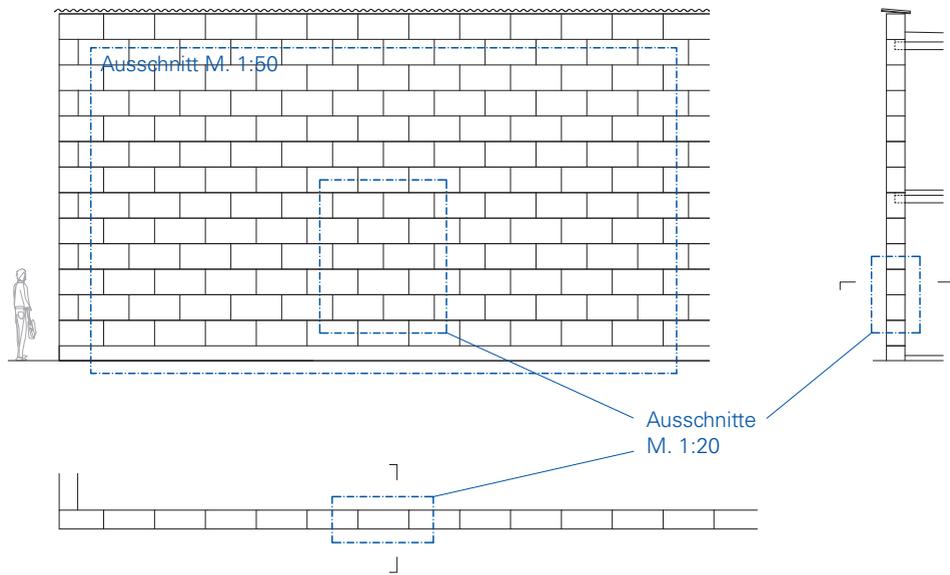


Abb. 5-27:
Exemplarische Wandfläche und Regel-Ausschnitte für Ansichts- und Schnittzeichnungen (M. 1:200)

Sonderlösungen erfordern. Die genauere Untersuchung jeglicher Bauteilränder (so z. B. auch Fassadenecken, Wandöffnungen, etc.) wird, zugunsten einer Eingrenzung des Betrachtungsrahmens der Untersuchungen, bewusst außer Acht gelassen.

Für die Erstellung der Studien wird davon ausgegangen, dass das gedachte Gebäude mit einem Flachdach überdeckt ist, wobei die Attikaabdeckung (Wellblech) an der Seite der betrachteten Wand einen Überstand von 10 cm aufweist. Der durch diesen Überstand vor Schlagregen geschützte Wandbereich ist somit vernachlässigbar klein. Was den Bereich des Wandsockels angeht, so wird von der Verwendung einfacher Mörtelleisten (M) in der untersten Lagerfuge ausgegangen, da hier lediglich der Fugenschutz zu gewährleisten ist.¹⁶

16 Die Verwendung einer Mörtelleiste ist hier auch deshalb besonders geeignet, da sie die Integration einer horizontalen Sperrlage in die Fuge vereinfacht.

5.3.2 Herstellungstechnische Annahmen

Da Erosionsleisten als „materialfremde“ Elemente in die Stampflehmwand integriert werden, ist sowohl das Prinzip, als auch die konstruktive Detaillierung ihrer Integration von zentraler Bedeutung für deren Dauerhaftigkeit – und somit für den Schutz der Oberfläche, der Mauerwerksfugen, sowie der Steinkanten.

Basierend auf Erkenntnissen aus den vorausgegangenen Untersuchungen (vgl. Kap. 4), werden im Folgenden einige Überlegungen zur Herstellung und Detaillierung von Erosionsleisten dargestellt, welche sich als Lösungsansätze verstehen und als solche die Grundlage der Anwendungsstudien bilden.

Fugenstärken

In Kap. 3 (vgl. S. 52) und Kap. 4 wurde für die horizontalen und vertikalen Mauerwerksfugen von Fugenstärken um die 10 mm ausgegangen. Zu vermuten ist jedoch, dass auch geringere Fugenstärken, welche zu einer Verringerung des Mörtelanteils in der Wand, und somit zur Steigerung ihrer Festigkeit führen, möglich sind. Fugenstärken von 2 mm für die horizontalen Lagerfugen, wie in Großformat-Mauerwerk aus Kalksandstein oder Porenbeton üblich, erscheinen ungeeignet, da für die Verwendung entsprechender Dünnbettmörtel eine hohe Maßgenauigkeit der Mauersteine einzuhalten ist. Diese ist bei Stampflehm vor allem vom Schwindmaß abhängig, für welches etwa Rauch von 0,25 % ausgeht, und die Firma Claytec für ihre Fertigmischung 0,5 % angibt.^{17, 18} Da ein Schwindmaß dieser Größenordnung bei Steinen der Schichthöhe 50 cm zu Maßabweichungen größer 1 mm führen kann, müssten die Elemente, ähnlich KS-Großformatsteinen, nach Trocknung geschliffen werden, was einen deutlichen Mehraufwand bedeutet. Als Mittelweg soll hier daher eine Fugenstärke von 5 mm (sowohl horizontal als auch vertikal) zugrunde gelegt werden, bei welchem ein Schleifen der Steine nicht notwendig ist.

Die Fügung der Mauersteine ohne jeglichen Mörtel, wie von Cointereaux vorgeschlagen (vgl. Kap. 3, S. 46), erscheint grundsätzlich eher experimentell, und zudem für den Einsatz ohne nachträglichen Verputz ungeeignet, da die Fugen zwischen den Steinen so besonders exponiert sind.

17 vgl. Rauch 2003, S. 652

18 vgl. Fa. Claytec, Produktblatt Stampflehm

Lage der Leiste



Abb. 5-28:
Mörtelleiste in Fugenebene

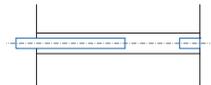


Abb. 5-29:
Vorgefertigte Leiste (Vf) in Fugenebene

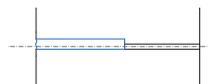


Abb. 5-30:
Mörtelleiste in Steinebene

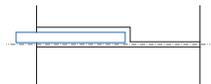


Abb. 5-31:
Vorgefertigte Leiste (Vf) in Steinebene

Bei Mörtelleisten (M) und vorgefertigten Leisten in der Fuge (Vf) eröffnen sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten hinsichtlich der Lage der Leiste: die Anordnung in Fugenebene, und die Anordnung in Steinebene. Wird die Leiste in Fugenebene angeordnet (Abb. 5-28, Abb. 5-29), so vergrößert sich die notwendige Fugenstärke deutlich, wodurch nicht nur in gestalterischer Hinsicht Einschränkungen entstehen, sondern auch wesentlich mehr Mauermörtel benötigt, und somit die Festigkeit des Mauerwerks verringert wird. Bei vorgefertigten Leisten muss zudem im hinteren Teil der Fuge ein Distanzstück vorgesehen werden, damit die darüber liegende Steinlage im noch weichen Mörtelbett nicht nach hinten kippt.

Um diese Nachteile zu umgehen, empfiehlt es sich, die Leiste in Steinebene anzuordnen (Abb. 5-30, Abb. 5-31). Hierzu wird der Lehmstein mit einer Aussparung hergestellt, in welcher die Leiste Platz findet. Die Aussparung sollte an der Stein-Unterseite vorgesehen werden, da sie hier einfacher als an der Steinoberseite – durch simples Einlegen einer Holzleiste in die Schalung – hergestellt werden kann. Bei vorgefertigten Leisten eröffnen sich auf diese Weise zudem mehr Möglichkeiten der Fügung der Leiste nach oben, zur ungeschützten Lehmfuge hin, da diese Fuge so in der Steinebene liegt und freier ausgestaltet werden kann. Konkret kann etwa ein Gefälle auf der Leistenoberseite sehr einfach umgesetzt werden (siehe z. B. Abb. 5-36, S. 171).

5.3.2.1 Mörtelleiste

Für die Stärke einer Mörtelleiste, und somit der Lagerfuge im vorderen Wandbereich, wird von min. 20 mm ausgegangen, um bei ungleichmäßiger Ausführung eine Mindeststärke von etwa 15 mm sicherzustellen (Abb. 5-32). Für die Leistentiefe wird von min. 10 cm ausgegangen. Im Bereich hinter der Leiste kann die Fugenstärke auf 5 mm verringert werden.

Der Kalkmörtel lässt sich in noch plastischem Zustand von außen nachformen, wobei sich im Regelfall ein Fugenglattstrich anbietet.

Nach Freilegung einer Mörtelleiste durch einsetzende Erosion besteht prinzipiell die Gefahr einer für die Lehmwand schädlichen Feuchteinwirkung durch stehendes Wasser auf der Leis-

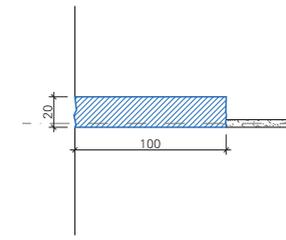


Abb. 5-32:
Mörtelleiste, ohne Gefälle

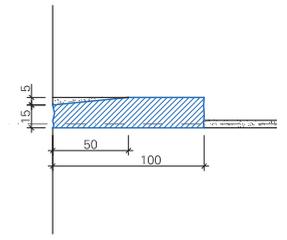


Abb. 5-33:
Mörtelleiste, mit Gefälle

tenoberseite.¹⁹ Um diese zu vermeiden, lässt sich die Oberseite der Mörtellage abschrägen, wodurch ein Gefälle zur Leistenvorderkante erzeugt wird, welches Feuchtigkeit von der Wand wegleitet. Hierzu kann z. B. nach Vermauerung ein Holzkeil eingedrückt, und nach dessen Erhärtung die verbleibende Fuge mit Lehmörtel gefüllt werden (Abb. 5-33). Dies ist jedoch mit einem erheblichen, händischen Mehraufwand verbunden. Zudem ist nicht gesichert, dass stehendes Wasser hier eine reelle Gefahr darstellt. Rauch etwa berücksichtigt bei Erosionsbremsen aus eingestampften Kalklagen in der Regel ein Gefälle, wohingegen bei vorstehenden Erosionsbremsen etwa bei Haus Rauch (vgl. Abb. 3-5, S. 37) kein Gefälle umgesetzt wurde.²⁰²¹ Für die Anwendungsstudien wird daher von einer waagerechten Leistenoberseite ausgegangen.

5.3.2.2 Vorgefertigte Leiste

Bezüglich der geometrischen Ausgestaltung vorgefertigter Leisten wird von Grundvoraussetzungen wie der Ausbildung eines Gefälles auf der Leistenoberseite, der Integration einer Tropfkante an der Vorderkante, sowie der Optimierung des Verbundes der Leiste mit dem Lehmstein (z. B. durch Vorsehen von Rillen) ausgegangen. Abb. 5-34 zeigt diese Merkmale als Detaillierungsschritte schematisch am Beispiel der Fügung der Leiste während des Vermauerns

¹⁹ Houben und Guillaud warnen vor einer Terrassenbildung durch die Verwendung von Kalkmörtel. Die Autoren beziehen sich jedoch auf Mauerwerk aus Adobe- oder gepressten Lehmsteinen, welche eine feinkörnigere Materialzusammensetzung aufweisen. Deren frei bewitterte Anwendung ist im europäischen Klima nicht üblich. Vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 259.

²⁰ Dies ist allerdings im Herstellungsprozess relativ einfach realisierbar.

²¹ vgl. Kapfinger, Sauer 2015, S. 72 f.

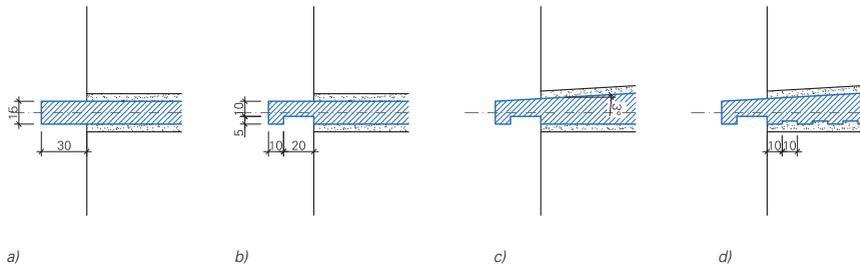


Abb. 5-34: Vorgefertigte Leiste, Detaillierungsschritte (M. 1:5)

(Vf). Das auf der Oberseite auszubildende Gefälle in Richtung der Vorderkante der Leiste sollte min. 5% (ca. 3°) betragen.²² Als Standard-Einbindetiefe der Leiste soll 13 cm angenommen werden. Dieses Maß ist größer gewählt als bei Mörtelleisten, da von einem etwas schwächeren Verbund zwischen Leiste und Lehmstein auszugehen ist.

In den in Kap. 4 dokumentierten Versuchen zeigte sich, dass bei vorgefertigten Leisten eine minimale Materialstärke von etwa 10 mm eingehalten werden sollte, um einem Bruch der Leiste während Herstellung und Aufbau vorzubeugen. Im Falle des Verbunds mit dem Lehmstein (Vv) ist die Leiste zudem Druck und Erschütterungen während des Stampfens ausgesetzt. Daher wird hier von einer Mindeststärke von 20 mm ausgegangen. Diese Angaben verstehen sich als grobe Anhaltswerte. Die tatsächlich notwendige Materialstärke ist stark abhängig von Faktoren wie der Art des Bindemittels, der genauen Materialzusammensetzung, sowie der Dauer der Aushärtung. Darüber hinaus ist zu vermuten, dass durch eine Armierung bzw. Zugbewehrung (z. B. mittels Glasfaser-Kurzfasern) die Festigkeit der Leiste erheblich gesteigert werden kann.

Was die Herstellung vorgefertigter Leisten angeht, kann bei Leistengeometrien, welche einen gleichförmigen Querschnitt aufweisen, von einer Fertigung im Strangpressverfahren ausgegangen werden. Für Leisten mit komplizierteren Geometrien kommt, zumindest für eine Produktion in kleinerem bis mittlerem Maßstab, die Herstellung mittels Silikonformen infrage. Wie die vorausgegangenen Untersuchungen (vgl. Kap. 4, S. 122) zeigten, erlauben diese

22 In Anlehnung an das empfohlene Gefälle für die Entwässerung von Flachdächern gemäß DIN 18351: *Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen*

eine maximale Freiheit in der geometrischen Ausformung der Leiste, sowie eine einfache Wiederverwendung.

Leiste in Fuge (Vf)

Zu vorgefertigten Erosionsleisten in der Fuge zeigt Abb. 5-36 einen Leistenquerschnitt mit Fügedetaillierung, welcher als Standard für die folgenden Anwendungsstudien dient.

Da bei der Fügung während des Vermauerns zwangsläufig eine ungeschützte Nassfuge oberhalb der Leiste entsteht, sollte das Gefälle auf der Leistenoberseite deutlich über 5% liegen. Hier ist daher ein Gefälle von 10% (ca. 6°) gewählt, welches relativ weit in den Wandquerschnitt hineinreicht, um auch bei fortgeschrittener Erosion (angenommene Erosionstiefe von etwa 3 cm gestrichelt dargestellt) ein Abfließen des Wassers zur Vorderkante sicherzustellen. Während die Fugenstärke hinter der Leiste 5 mm beträgt, liegt diese oberhalb der Leiste bei 10 mm. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Hauptlast der oberen Steinlage(n) während der Aushärtung des Mörtels über den hinteren Wandbereich abgetragen wird. Da die Leiste aufgrund des Mauerwerkverbandes entweder auf mehreren Steinen aufliegt, oder aber mehrere Steine auf ihr aufliegen – und daher in der Praxis eine ungleichmäßige Belastung gegeben ist – wird so ein Bruch verhindert. Eine nachträgliche Fügung der Leiste von außen ist prinzipiell ebenso möglich, bringt aber den Nachteil mit sich, dass hierzu das Gefälle auf der Leistenoberseite (s. u.) gering gehalten werden muss. Besonders für den vorderen Fugenbereich über der

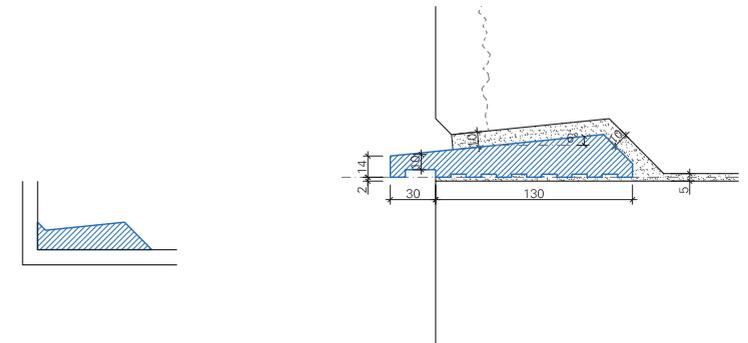


Abb. 5-35: Negativform für die Steinherstellung (M. 1:10)

Abb. 5-36: Vorgefertigte Leiste in der Fuge (Vf), Beispiel-Leistenquerschnitt und Fügedetaillierung (M. 1:5)

Leiste wird von einem möglichst fetten, d. h. tonhaltigen Mauermörtel ausgegangen, durch welchen eine höhere Witterungsbeständigkeit der Fuge erreicht wird. Ein solcher, darüber hinaus besonders feinkörniger Lehmörtel oder -kleber wird auch für die 2 mm starke Fuge zwischen Leiste und unterem Lehmstein verwendet.

Die Geometrie der Leiste im hinteren Teil ist so angepasst, dass sich stumpfe Winkel am Lehmstein ergeben, was eine höhere Kantenstabilität bei Fertigung, Transport und Versatz zur Folge hat. Aus diesem Grund ist auch die Lehmsteinkante oberhalb der Leiste leicht abgefast. Zudem wird hierdurch eine höhere Erosionsbeständigkeit dieser erreicht. Abb. 5-35 zeigt die entsprechende Negativform für die Steinherstellung, welche zuunterst in die Schalung eingelegt wird.

Als Länge des horizontalen Leistenelements bietet sich in den meisten Fällen die Länge des Mauersteins (Nennmaß) an. Gerade bei kleineren Steinformaten kann die Leiste prinzipiell aber auch über mehrere Steinlängen reichen. In den Studien werden standardmäßig 100 cm lange Leistenelemente gezeigt.

Der Leisten sollten im Regelfall auf Achse mit den Stoßfugen der Steinlage oberhalb gestoßen werden, um etwaige Undichtigkeiten am Stoßpunkt von den vertikalen Fugen der unteren Steinlage fernzuhalten. Bei stranggepressten Leisten ist lediglich ein stumpfer Stoß möglich, welcher sorgfältig zu vermörteln bzw. zu verkleben ist. Bei Leistentypen mit einem ungleichförmigen Querschnitt, für welche eine Herstellung durch Strangpressen ausscheidet, kommen grundsätzlich auch aufwendigere Stoßausbildungen, etwa durch Verzahnung oder Überblattung der Leisten, infrage, welche ggf. nicht der Vermörtelung bedürfen.

Verbund mit Lehmstein (Vv)

Der in Abb. 5-38 gezeigte Standard-Querschnitt für eine vorab gefügte Leiste weist im Vergleich mit der besprochenen Geometrie der vom Stein getrennten Leiste einen etwas geringeren Überstand von 2 cm auf, um die Nachteile bei Herstellung und Handling zu minimieren. Wie in Abb. 5-37 schematisch gezeigt, wird bei der Steinherstellung nach Einlegen der Leiste an den vorderen, unteren Steinrand ein zusätzliches, vertikales Schalbrett in die Schalung eingelegt, welches das Maß des Zurücktretens die Vorderkante des späteren Lehmsteins definiert. Um der erhöhten Bruchgefahr Rechnung zu tragen, beträgt die minimale Stärke der Leiste 2 cm, woraus eine

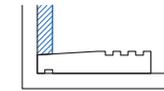


Abb. 5-37:
Eingestelltes Schalbrett
zur Herstellung einer
überstehenden Leiste, (M. 1:10)

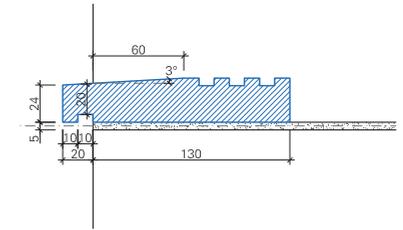


Abb. 5-38:
Vorgefertigte Leiste im Stein integriert (Vv)
Beispiel-Leistenquerschnitt und Fugedetailierung
(M. 1:5)

Ansichtsbreite von 24 mm resultiert. Das Gefälle auf der Oberseite beträgt lediglich 5%, da aufgrund des Verbundes zwischen Leiste und Lehmstein nur geringe Gefahr eindringender Feuchte besteht. Im hinteren Bereich der Leiste geht das Gefälle in eine Kammstruktur über, welche eine gute Haftung am Lehmstein sicherstellt.

Aus konstruktiven Gründen sollte die Leiste in jedem Fall am unteren Elementrand angeordnet werden, da so die horizontale Lagefuge direkt unterhalb dieser liegt und durch deren Überstand (inkl. Tropfkante) geschützt wird. Zudem wird auf diese Weise verhindert, dass der offene Leistenstoß, welcher eine potentiell kritische Stelle darstellt, nicht über den vertikalen Fugen der darunter befindlichen Steinlage liegt.

5.3.2.3 Hybridformen

Unter den möglichen Hybridformen ist, wie erwähnt, vor allem die Kombination einer vorgefertigten Leiste in der Fuge (Vf) mit einer Mörtelleiste geeignet. In Abwandlung der oben besprochenen Standard-Fügung kann in der oberhalb der Leiste befindlichen, grundsätzlich erosionsanfälligen Fuge Kalkmörtel zum Einsatz kommen, um diese zusätzlich zu schützen, bzw. ein tieferes Eindringen von Feuchtigkeit in den Wandquerschnitt zu verhindern. Dabei sollte jedoch nur ein Streifen im hinteren Teil der Leiste mit Kalkmörtel ausgeführt werden, damit dieser im Zuge der fortschreitenden Erosion nicht freigelegt wird, und somit die Wirkung der Oberfläche beeinflusst (Abb. 5-39, folgende Seite).

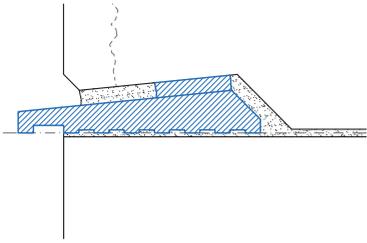


Abb. 5-39:
Beispiel hybride Herstellungsweise (Vf/M), Beispiel-
Leistenquerschnitt und Fügedetailierung (M. 1:5)

5.3.2.4 Besonderheiten bei einzelnen Typen

Hg-Vf (*Abhalten, gleichförmig – vorgefertigte Leiste in Fuge*), Hu-Vf (*Abhalten, ungleichförmig – vorgefertigte Leiste in Fuge*)

Grundsätzlich muss aufgrund des relativ großen Leistenüberstandes bei diesen Typen auf eine ausreichend tiefe Einbindung in die Wand geachtet werden, damit die Leiste sicher gehalten wird. Um das Abfließen des Wassers zur Vorderkante sicherzustellen, sowie das Abtropfen hier zu beschleunigen, ist deren Oberseite in jedem Fall mit Gefälle auszubilden. Das Gefälle kann nach vorne, von der Wand weg gerichtet sein (lineares Abtropfen), oder auch zur Seite, in Wandachse, um das Wasser zu definierten Abtropfstellen zu leiten (punktuelleres Abtropfen). Die Vorderkante der Leiste sollte hier zwingend eine Tropfkante aufweisen, damit ausgeschlossen werden kann, dass Wasser an der Unterseite der Leiste zurück zur Wand fließt.

Während der Erstellung der Wand muss mit temporären Abstützhilfen gearbeitet werden, da die Leisten erst durch die Auflast der nächsten Steinlage in der Wand gehalten werden.

Lf-Vf (*Ableiten über Fugen – vorgefertigte Leiste in Fuge*)

Beim Ableiten über die Fugen ist für die zuverlässige Kanalisierung des Wassers eine gute Abstimmung der Lage der horizontalen und vertikalen Leisten zueinander unabdingbar. Sowohl der Fügung der Leisten mit den Lehmsteinen, als auch der Gestaltung

der Fügepunkte der Leisten untereinander (horizontale und vertikale Stoßpunkte) kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Über die Berücksichtigung notwendiger Toleranzen hinaus muss insbesondere sichergestellt sein, dass an den Fugestellen kein Wasser in Richtung Wand entweichen kann.

Da die Rinnen der horizontalen Leisten nach oben hin offen sind, sollten ihre Rückseite zum Schutz der Lehmoberfläche höher als die Rinnenvorderkante ausgebildet werden, sodass eine Notentwässerung über diese möglich ist. Auch für die Rinnen der vertikalen Leisten ist ein U-förmiger Querschnitt, mit einer der Fassade abgewandten, offenen Seite sinnvoll. Im Vergleich mit einem geschlossenen Querschnitt wird so die Gefahr einer Verstopfung der Rinne verringert, als auch eine schlankere Ansicht der vertikalen Leisten erreicht (→ Studie S. 206). Um das Maß an Spritzwasser am unteren Fügepunkt mit der horizontalen Leiste gering zu halten, können im Innern der vertikalen Leisten Barrieren vorgesehen werden, entlang derer, ähnlich wie bei einer Regenablaufkette, das Wasser abgebremst herunterläuft.

Anhaltswerte für die Bemessung der Querschnitte der horizontalen und vertikalen Leisten bietet die DIN 1986-100 in Verbindung mit DIN EN 12056-3 (*Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung*), welche die Dimensionierung vorgehängter Regenrinnen und -fallrohre zur Dachentwässerung regelt. Grundlage der Bemessung ist hier die sogenannte *Berechnungsregenspende*, welche $r_{(5,5)}$ (vgl. Kap. 3, S. 57) entspricht. Aus der Berechnungsregenspende wird der spezifische *Regenwasserabfluss* auf der Dachfläche ermittelt. Nach diesem bemessen sich das erforderliche *Abflussvermögen* von Dachrinne und Regenfallrohr sowie schließlich die erforderlichen freien Querschnitte. Dabei hat bei relativ kurzen Rinnen²³ ein Gefälle kaum Einfluss auf dessen Ablaufvermögen.²⁴ Die Notentwässerung vorgehängter Dachrinnen erfolgt gemäß DIN über die Rinnenvorderkante.²⁵

Bei der Verwendung von Erosionsleisten des Typs Lf-Vf handelt es sich jedoch um ein in hydrologischer Hinsicht deutlich komplexeres System als bei einer herkömmlichen Dachentwässerung. Die Komplexität entsteht vor allem durch die Reihung meh-

23 im Sinne der DIN handelt es sich im hydraulisch "kurze" Rinnen, wenn deren Länge nicht größer ist als das 50-fache der Überlaufhöhe, also der Rinnentiefe.

24 vgl. DIN 2001, Tabelle 6, S. 8

25 vgl. DIN 2008, S. 68

erer Rinnen hintereinander, wobei zahlreiche Richtungsänderungen bzw. Übergaben des Wasserabflusses von horizontalen zu vertikalen Rinnen und umgekehrt stattfinden. Es ist anzunehmen, dass hierdurch das Ablaufvermögen der Rinnenquerschnitte verringert wird. Auch besteht eine erhöhte Gefahr der Verstopfung der Rinne (oder zumindest Behinderung des Wasserabflusses) durch Sedimentation erodierten Lehms auf der Leiste. Um diese weitestgehend zu verhindern, ist zumindest die Umsetzung eines minimalen Längsgefälles zu empfehlen. Im Rahmen der Anwendungsstudien wird ein Gefälle von 1% angesetzt.

Aufgrund dieser Gegebenheiten ist es empfehlenswert, bei der Bemessung der Rinnenquerschnitte in Anlehnung an DIN 1986 und DIN EN 12056 einen entsprechenden Sicherheitsbeiwert mit einzubeziehen.

Auch was die Notentwässerung angeht, stellt eine Stampflehmfassade offensichtlich einen besonderen Kontext dar. Abhängig von Standortbedingungen und Materialqualität ist sorgfältig einzuschätzen, ob ein Überlaufen des Wassers über die Leistenvorderkante in Kauf genommen werden kann. Im Zweifel sollte ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor bei der Dimensionierung berücksichtigt werden.

Als Beispiel der Bemessung soll eine etwa 7 m hohe, frei bewitterte Fassadenfläche dienen, in welcher der Abstand der vertikalen, wasserführenden Leisten untereinander 1 m beträgt (Typ Lf-Vf mit Elementbezug). Dieses Beispiel entspricht der auf S. 206 gezeigten Anwendungsstudie. Als Berechnungsregenspende wird hier 312 l/s·ha zugrunde gelegt (vgl. Kap. 3, S. 57), Dieser Wert wird aufgrund der oben genannten Aspekte mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 multipliziert (= 468 l/s·ha).²⁶ Die Berechnung des Re-

26 Zum Vergleich: gemäß DIN 1986-100 (vgl. DIN 2008) betragen die Regenmengen eines „Jahrhundertregens“, also eines Niederschlagsereignisses, welches alle 100 Jahre auftritt, im Schnitt das 1,8-fache der hier zugrunde gelegten, alle fünf Jahre überschrittenen Menge. (Siehe DIN 1986-100:2008, Tabelle A.1, S. 82 ff.)

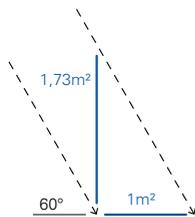


Abb. 5-40: Berechnung der wirksamen Fassadenfläche

genwasserabflusses in Anlehnung an DIN 1986 ergibt 0,18 Liter pro Sekunde (l/s).²⁷ Hieraus ergeben sich notwendige freie Querschnitte von 35 x 35 mm für die horizontalen Leisten, sowie von 22 x 22 mm für die vertikalen Leisten.²⁸

Diese Bemessung betrifft die horizontalen und vertikalen Erosionsleisten der untersten Steinlage der Wand. Da die abzuleitende Wassermenge nach oben hin abnimmt, könnten folglich die Rinnenquerschnitte der oberen Steinlage verringert werden. Aus Gründen der Herstellungseffizienz (serielle Produktion der Leisten) und der Gestaltung ist diese Option vermutlich jedoch von geringer Relevanz.

Insgesamt ergibt sich aufgrund der beschriebenen Punkte – vor allem der Komplexität der Leistengeometrie und -fügung, sowie den notwendigen Leistenquerschnitten – ein in Herstellung und Montage aufwendiges System.

- 27 Gemäß DIN 1986-100 (vgl. DIN 2008) ist der Regenwasserabfluss nach der Gleichung $Q = r \cdot C \cdot A \cdot 1/10000$ zu ermitteln, wobei r die Berechnungsregenspende, C den Abflussbeiwert, sowie A die wirksame Niederschlagsfläche darstellen. Der Abflussbeiwert C wird durch die Oberflächenbeschaffenheit der ableitenden Fläche bestimmt, und berücksichtigt ein eventuelles Rückhaltevermögen dieser, welches den Wasserabfluss verzögert. Er beträgt z. B. für wasserundurchlässige Dachflächen 1,0, und für teildurchlässige, schwach ableitende Fläche wie wassergebundene Flächen 0,5. Welcher Wert hier für vertikale Stampflehmoberflächen – die zum einen eine gewisse Wasseraufnahmefähigkeit besitzen, und zum anderen den Wasserabfluss bremsen (vgl. S. 72) – anzusetzen ist, lässt sich nicht ohne spezielle Untersuchungen bestimmen. Hier soll daher von einem Wert von 1,0 ausgegangen werden. Die wirksame Niederschlagsfläche lässt sich über die vertikale Projektion der Horizontalen, relativ zu einem angenommenen Schlagregenwinkel, ermitteln (siehe Abb. 5-40). Sie entspricht hier der mit den Faktor 0,58 ($1\text{m}^2 / 1,73\text{m}^2$) multiplizierten, vertikalen Wandfläche (hier $0,58 \cdot 7\text{m}^2 = 4,06\text{m}^2$). Als Regenwasserabfluss ergibt sich somit: $Q = 468\text{ l/s} \cdot \text{ha} \cdot 1,0 \cdot 4,06\text{m}^2 / 10000 = 0,18\text{ l/s}$.
- 28 Da es sich bei den horizontalen Leisten in diesem Berechnungsbeispiel um „kurze“ Rinnen im Sinne der DIN handelt, kann die Bemessung des Abflussvermögens Q_L der Rinnen nach der Formel $Q_L = 0,9 \cdot Q_N$ erfolgen, wobei Q_N nach der Formel $Q_N = 2,78 \cdot 10^{-5} \cdot A_E^{1,25}$ (A_E ist hier der Rinnenquerschnitt in mm^2) zu ermitteln ist. Für einen Rinnenquerschnitt von $35 \times 35\text{ mm} = 1225\text{ mm}^2$ ergibt sich somit: $Q_N = 2,78 \cdot 10^{-5} \cdot A_E^{1,25} = 2,78 \cdot 10^{-5} \cdot 1225^{1,25} = 0,20\text{ l/s}$ und folglich $Q_L = 0,9 \cdot Q_N = 0,18\text{ l/s}$. (Siehe DIN EN 12056 - 3 : 2000, Gleichung (3), S. 5) Für das Abflussvermögen Q_{RNP} von Regenfallrohren gilt die Formel $Q_{RNP} = 2,5 \times 10^{-4} \times k_b^{-0,167} \times d_i^{2,667} \times f^{1,667}$. Um jedem der horizontalen Rinnen zu entsprechen, ist daher ein Innendurchmesser von etwa 22 mm notwendig, was einem rechteckigen Querschnitt von $22 \times 22\text{ mm}$ gleichzusetzen ist. ($Q_{RNP} = 2,5 \times 10^{-4} \times 0,25^{-0,167} \times 22^{2,667} \times 0,33^{1,667} = 0,19\text{ l/s}$. Siehe DIN 2001, Tabelle 8, S. 16)

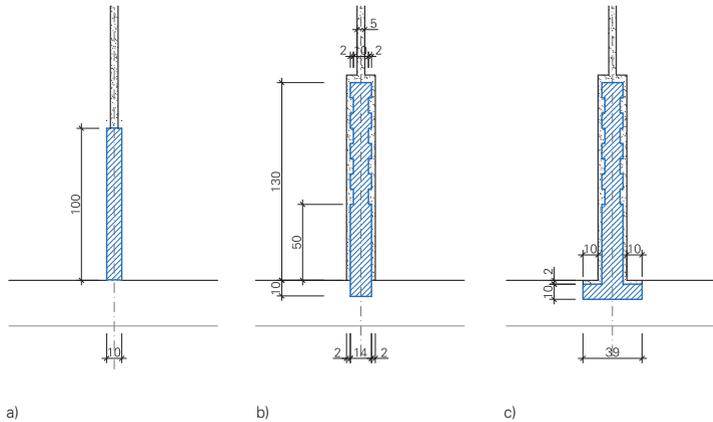


Abb. 5-41:
 Grundvarianten vertikaler Erosionsleisten: a) Mörtelleiste, b) vorgefertigte Leiste ohne Umgriff,
 c) vorgefertigte Leiste mit Umgriff

Lr-Vf (Ableiten über Regelsteine – vorgefertigte Leiste in Fuge), Ls-Vf (Ableiten über Sondersteine – vorgefertigte Leiste in Fuge)

Auch beim Ableiten des Wassers über die Steinoberfläche müssen die horizontalen Erosionsleisten Rinnen ausbilden, um das Wasser sicher zu den Stellen der vertikalen Weitergabe zu leiten. Die erforderlichen Querschnitte sind analog zu der bei Typ Lf-Vf (s. o.) erläuterten Vorgehensweise zu bemessen. Die Komplexität des Systems der Wasserleitung, und damit die Bedeutung der Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren, ist hier jedoch geringer, da vertikale Leisten entfallen bzw. nicht Teil des Ableitungssystems sind.

Was die Lage bzw. Fügung der Leiste angeht, so ist bei Typ Ls-Vf (→ Studie S. 218) eine Abweichung von dem auf S. 171 (Abb. 5-36) gezeigten Standard sinnvoll. Aufgrund des direkten Bezugs der Leiste zum Lehmstein unterhalb – um den das Wasser herum geleitet wird – erscheint hier die Fügung am oberen Elementrand geeigneter. Darüber hinaus ist so ein größerer Abstand zwischen der gebündelten Wasserführung und dem oberhalb befindlichen, nicht stabilisierten Regelstein einhaltbar.

Um hier die Erfordernis einer zweiten Aussparung an der Steinunterseite – zur Aufnahme eines Gefälles auf der Leistenoberseite – zu vermeiden, bietet es sich an, die darüber liegenden, hori-

zontale Fuge in Kalkmörtel auszuführen (hybride Herstellungsweise), und somit eine Feuchteinwirkung entlang dieser zu verhindern.

5.3.2.5 Vertikale Leisten

Bei vertikalen Erosionsleisten ergeben sich im Vergleich mit horizontalen Leisten leicht veränderte Anforderungen an die formale Ausbildung und Fügung. So ist ein Überstand über die Lehmoberfläche funktional nicht erforderlich, ebenso entfällt die Ausbildung einer Tropfkante.

Bei Mörtelleisten (Abb. 5-41a) wird, analog zu horizontalen Mörtelleisten, von einer Mindest-Einbindetiefe von 10 cm ausgegangen. Bezüglich der Leistenstärke wird angenommen, dass aufgrund der hier geringeren Anforderungen im Vergleich mit horizontalen Mörtelleisten ein Mindestmaß von 10 mm ausreichend ist.

Zu vorgefertigten vertikalen Erosionsleisten zeigen Abb. 5-41b und Abb. 5-41c verschiedene Möglichkeiten der Ausführung. Abb. 5-41b zeigt eine Leiste mit geringer Ansichtsbreite, welche durch flankierende Mörtelfugen von 2 mm Stärke eingefasst wird. Aufgrund der geringen Fugenstärke, sowie des durch den Überstand gegebenen, höheren Schlagregenschutzes (bei Windrichtung ungleich 90° zur Wandoberfläche) kann hier von einer ausreichenden Dauerhaftigkeit der Fügung ausgegangen werden. Einen darüber hinaus reichenden Fugenschutz bietet die in Abb. 5-41c gezeigte Leiste, welche die Steinkanten umgreift, jedoch auch eine deutlich größere Ansichtsbreite erzeugt. Wie bei ihren horizontalen Pendanten wird bei vorgefertigten vertikalen Leisten von einer Mindest-Einbindetiefe von 13 cm ausgegangen. Im hinteren Teil, welcher auch bei einer maximalen Erosion verdeckt bleibt, können Rillen bzw. Vertiefungen vorgesehen werden, damit sich die Leiste bestmöglich mit dem Lehmörtel verzahnt. Die Leisten können während des Vermauerns gefertigt, oder auch nachträglich eingesetzt bzw. -geklebt werden.

5.3.2.6 Steinkanten

Wie in Abschnitt 5.1. (vgl. S. 139) erwähnt, ist auch der Umgang mit den Steinkanten ein wichtiger Aspekt hinsichtlich des Schutzes der Wand vor Erosion. Hierbei sollte differenziert werden zwischen einer Erhöhung der Stabilität der Kantenbereiche durch deren materielle und geometrische Ausgestaltung, sowie einem zusätzlichen Schutz durch Erosionsleisten.

Die grundsätzlich geringere Festigkeit der Steinkanten rührt zunächst aus der Ecksituation, d. h. aus der auf null auslaufenden Materialstärke im Kantenbereich. Dieser Aspekt wird bei Stampflehm dadurch verstärkt, dass der festigende Einfluss der Grobkörner hier geringer ausfällt, da diese die Kantenbereiche nicht hinreichend ausfüllen. Zudem können die Steinkanten meist nicht optimal verdichtet werden, und sind daher in der Regel offenerporiger und somit feuchteanfälliger.

Eine Möglichkeit der Erhöhung der Stabilität ist daher die Verwendung einer feinkörnigeren Materialmischung im Kantenbereich, was jedoch zusätzliche Herstellungsschritte und somit einen größeren Aufwand bedeutet. Eine andere Option, welche die Stein-geometrie betrifft, ist das Fasen bzw. Brechen der Kanten. Horizontal kommt dies vor allem für den unteren Steinrand, wie auch beim in Abb. 5-36 (vgl. Abb. 5-36, S. 171) gezeigten Beispiel, in Betracht. Ein Fasen der vertikalen Steinkanten erscheint hingegen problematisch, da hierdurch eine deutlich größere Angriffsfläche für das Regenwasser entsteht.

Darüber hinaus kann auch der Gebrauch von Erosionsleisten zum Schutz der Steinkanten beitragen.

So ist bei Mörtelleisten aufgrund des guten Verbundes zwischen Leiste und Lehmstein ein gewisser Schutz der Steinkanten gegeben. Die Stärke dieses Schutzes hängt vermutlich entscheidend von der Haftung, und damit auch vom Vorhandensein eventueller Schwindrisse zwischen den beiden Materialien ab.

Bei vorgefertigten Leisten in der Mauerwerksfuge (Vf) ist in der Regel die obere, horizontale Steinkante (wie auch die Lagerfuge) überdeckt, und somit weitestgehend vor Erosion geschützt. Die untere (also oberhalb der Leiste befindliche) Steinkante ist mittels der Erosionsleiste nicht schützbar. Anders ist dies bei der Herstellungsweise Vv, da hier der Verbund zwischen Leiste und Lehmstein für einen gewissen Schutz sorgt.

Bei Verwendung vertikaler, vorgefertigter Leisten können die Steinkanten (und zudem die Stoßfugen) durch einen äußeren Umgriff der Leiste geschützt werden (vgl. Abb. 5-41c).

5.3.2.7 Reparatur und Ersatz

Bei Schäden an Erosionsleisten kann zunächst eine Reparatur von außen vorgenommen werden. Im Falle irreparabler Schäden an vorgefertigten Leisten kann es jedoch notwendig sein, die Leiste

als Ganze zu ersetzen. Hierzu ist im betreffenden Randbereich des Lehmsteins Material abzutragen, eine neue Erosionsleiste einzusetzen, und – ähnlich wie bei der Retusche von Lehmfugen (vgl. S. 41) – ein neuer Verbund über die Einarbeitung und Verdichtung erdfeuchten Lehms von außen herzustellen.

5.3.3 Annahmen der Erosionsprognose

Wie in Kap. 3 (vgl. S. 61) erläutert, ist der natürliche Erosionsprozess bei Lehmfassaden ein komplexer Vorgang, welcher von zahlreichen Einflussfaktoren bestimmt wird. Eine verlässliche Vorhersage dieses Prozesses ist daher extrem schwierig. Auch eine computergestützte, numerische Simulation erscheint problematisch. Laut Prominski et al. ist etwa die Abflussdynamik bei Fließgewässern derart komplex, dass sie nicht wissenschaftlich vorhersehbar ist.²⁹ Noch dazu liegen für Stampflehm, aufgrund seiner besonderen materiellen Struktur, bislang keine Rechenwerte vor.³⁰

Aus diesem Grunde können die hier getätigten Abschätzungen des Maßes der Erosion nur eine grobe Orientierung bieten, und sollen primär eine qualitative Vergleichbarkeit der Typen ermöglichen.

Die Abschätzung stützt sich zunächst auf die in Kap. 4 dokumentierten Untersuchungen, in welchen die Umleitung und Bündelung des Wassers als wirkungsvolle Eingriffe in den Wasserablauf bestätigt, und grundsätzliche Beobachtungen zum Ablaufverhalten des Wassers gemacht werden konnten. Bezüglich des Maßes der Erosion werden darüber hinaus grobe Anhaltspunkte zu Hilfe genommen bzw. Annahmen getroffen.

Dabei soll nur der Teil der Erosion, welcher durch das Auftreffen und vertikale Abfließen des Regenwassers auf der Wandoberfläche entsteht, berücksichtigt werden. Relativ zur angenommenen Schlagregenbeanspruchung (vgl. S. 165) werden für die Abschätzung des Maßes der Erosion zwei Parameter in Betracht gezogen. Zum einen die vertikale Lauflänge, d. h. die maximale Strecke, welche das Wasser ungebremst auf der Oberfläche nach unten fließen kann, zum anderen die Wassermenge. Beide Faktoren sind für das Maß der Erosion bestimmend (vgl. S. 72).

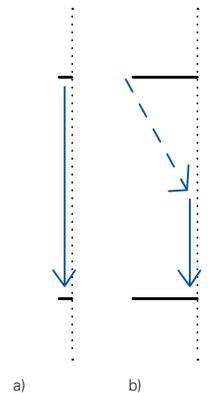


Abb. 5-42:
Lauflänge des Wassers:
a) Abbremsen, b) Abhalten

²⁹ vgl. Prominski et al. 2012, S. 22

³⁰ Gespräch mit Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf (Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen), Dezember 2017.

Lauflänge des Wassers	Herstellungsweise der Erosionsleiste	Erosionstiefe oberer Bereich	Erosionstiefe unterer Bereich
100 cm	vorgefertigte Leiste	1 cm	3 cm
	Mörtelleiste	2 cm	3,5 cm
50 cm	vorgefertigte Leiste	1 cm	2 cm
	Mörtelleiste	2 cm	2,5 cm
25 cm	vorgefertigte Leiste	1 cm	1,5 cm
	Mörtelleiste	1,5 cm	2 cm
12,5 cm	Mörtelleiste	1 cm	1,5 cm

Tab. 5-5: Maß der Erosion nach Ablauflänge des Wassers

Die Lauflänge des Wassers ist abhängig vom vertikalen Abstand der Erosionsleisten, als auch ggf. vom Überstand der Leisten (Abb. 5-42, vorige Seite). Was das Maß der Erosion nach Lauflänge angeht, so soll eine Orientierung an den in Tab. 5-5 (S. 182) angegebenen Richtwerten für die Tiefe des flächigen Abtrags der Oberfläche erfolgen. Die Annahme dieser Werte stützt sich vor allem auf Angaben von Rauch (vgl. S. 74), welche als für eine durchschnittliche Schlagregenbeanspruchung ansetzbar angesehen werden.³¹ Für den unteren Bereich der Steinlage ist eine etwas stärkere Erosion anzunehmen. Bei vorgefertigten Leisten wird von einem Überstand von 2 cm, sowie einer Tropfkante ausgegangen. Aufgrund dessen ergibt sich ein geringeres Erosionsmaß als bei Mörtelleisten, vor allem im oberen Bereich der Steinlage.

Die Menge des Wassers, die in einem bestimmten Bereich abfließt, ist hingegen abhängig von der Fassadenhöhe, sowie eventuellen Bündelungen des Wasserablaufs. Die Fassadenhöhe bestimmt im Wesentlichen, wieviel Wasser im unteren Wandbereich anfällt. Außer beim vollständigen Abhalten von der Fassade wächst dessen Menge bei allen Wirkungsweisen vom Dachrand zum Wandsockel hin kontinuierlich an. Beim Abbremsen etwa hat dies in der

31 Eine Inbezugsetzung dieser Anhaltsgrößen zu anderen Schlagregenexpositionen im Sinne der DIN EN ISO 15927-3 (Regenmenge, Ausrichtung der Fassade, etc.; vgl. S. 57) soll hier nicht erfolgen, da sie mangels Untersuchungen in diesem Bereich besonders spekulativ erscheint.

Theorie zur Folge, dass das Maß der Erosion ebenso von Mauerwerksschicht zu Mauerwerksschicht zunimmt. Jedoch soll für den Kontext der Anwendungsstudien angenommen werden, dass dies durch die nach oben hin zunehmende Wind- bzw. Schlagregenbeanspruchung (vgl. Kap. 3, S. 59) in etwa ausgeglichen wird.

Bei den Wirkungsweisen des Ableitens über Regelsteine und Sondersteine (Lr, Ls) kommt der Effekt der Bündelung des Wassers hinzu. Abhängig von der Distanz der Umleitung des Wassers je Steinlage kann hiermit eine beachtliche Vergrößerung der Wassermenge einhergehen, welche in den Bereichen der vertikalen Ableitung auftritt (vgl. Abb. 5-17, S. 150). Dabei verhält sich die Menge des gebündelt geführten Wassers proportional zur Distanz der Umleitung. Die Zunahme nach unten hin erfolgt um das gleiche Maß je Steinlage.

Für eine grobe Annäherung an das Maß der Erosion an den Stellen der vertikalen Ableitung des Wassers soll vereinfachend angenommen werden, dass sich die Menge des Wassers proportional auf die Gesamtmenge des Materialabtrags auswirkt. Wird weiter angenommen, dass der Bereich der erhöhten Auswaschung in etwa den Querschnitt eines rechtwinkligen, gleichschenkligen Dreiecks aufweist (Abb. 5-43), so entspricht die maximale Tiefe der Erosion der Quadratwurzel der Querschnittsfläche (F) – welche sich wiederum aus dem Produkt von Umleitungsdistanz und Fassadenhöhe, gemindert um einen Skalierungsfaktor, ergibt.

Dieses Maß der Erosion durch Bündelung des Wasserablaufs ist jenem durch Lauflänge (vgl. Tab. 5-5) zuzuschlagen. Somit lässt sich folgende Formel zur überschläglichen Bestimmung der Gesamt-Erosionstiefe aufstellen:

Wenn:

t = Erosionstiefe an der Stelle der vertikalen Ableitung in jeweiliger Mauerwerksschicht [cm],

g = Erosionstiefe durch Lauflänge [cm],

d = Umleitungsdistanz [cm],

n = Anzahl darüberliegender Mauerwerksschichten, und

s = Skalierungsfaktor,

so soll gelten:

$$t = g + \sqrt{d \cdot n \cdot s} \quad (1)$$

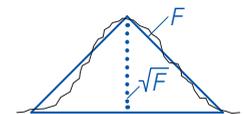


Abb. 5-43: Querschnitt des Bereichs der erhöhten Auswaschung und maximale Erosionstiefe.

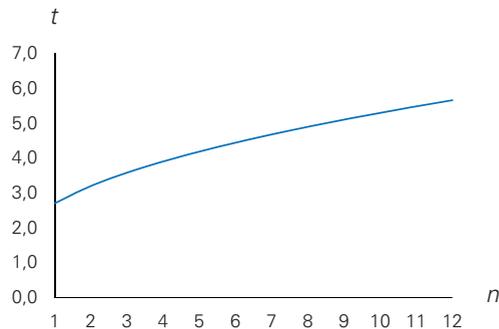


Abb. 5-44: Erosionstiefe t in Abhängigkeit von n , für $s = 0,015$ und $d = 1\text{m}$ (gemäß Formel 1)

Für den Skalierungsfaktor s soll hier der Wert $0,015$ angesetzt werden, welcher auf einer Abschätzung des Erosionsmaßes beruht. Bei der Wirkungsweise des Ableitens über die Fläche, einer Umleitungsdistanz von 1 m , einer Fassadenhöhe von $6,5\text{ m}$ bei einer Schichthöhe von 50 cm (13 Steinlagen), sowie der Verwendung vorgefertigter Leisten, ergäbe sich somit in den Bereichen der vertikalen Ableitung des Wassers in der untersten Steinlage eine Erosionstiefe von: $t_1 = 1,5 + \sqrt{100 \cdot 12 \cdot 0,015} = 5,7\text{ cm}$. Weitere Erosionstiefen in Abhängigkeit der Anzahl darüberliegender Mauerwerksschichten sind in Abb. 5-44 dargestellt.

Was den Einfluss vertikaler Leisten angeht, so ist mit etwas geringerer Erosion an Steinrändern zu rechnen, welche durch diese eingefasst sind, da je nach vorherrschender Windrichtung jeweils eine Seite etwas stärker vor auftreffendem Regenwasser geschützt ist. Wie beschrieben, wird hier der Einfachheit halber eine gleichmäßige Beanspruchung von beiden Seiten angenommen.

5.3.4 Darstellungsregeln

Für den zeichnerischen Teil der Anwendungsstudien wird eine grafisch reduzierte Art der Darstellung gewählt, welche die vergleichende Betrachtung der Studien vereinfachen soll.

Während die Schnittzeichnungen als einfache Liniengrafiken erstellt sind, werden in den Ansichtszeichnungen auch Flächen angelegt. Primär zugunsten einer klaren Unterscheidung der Baustoffe Lehm und Kalk (bzw. Beton) sind diese zudem farbig gestaltet. Für die Darstellung von Zustand 1 (Ursprungszustand) wird hier von einer relativ glatten, feinkörnigen Oberfläche ausgegangen, auf der die charakteristische Schichtenzeichnung der Stampflagen zutage tritt.³² Das prognostizierte Maß der Erosion in Zustand 2 wird durch drei verschiedene, grafische Parameter angegeben: die Art der Körnungsschraffur, die Farbe der Körnungsschraffur, sowie die Hintergrundfarbe. Die Art der Körnungsschraffur stellt den Grad der Oberflächenrauheit dar, die Farbe der Körner sowie des Hintergrundes hingegen die Tiefe der Erosion.

Kombinationen unterschiedlicher Werte dieser Parameter sind entsprechenden, in Abb. 5-45 dargestellten Erosionstiefen zugeordnet, und werden für die Ansichtszeichnungen im Maßstab $1:20$ verwendet. Der Anschauung halber wird hierbei die Darstellung der größeren Erosionstiefen (ab 4 cm) etwas überzeichnet. Für die Ansichten in $1:50$ wird eine dem Maßstab angemessene Adaption dieser Darstellungsregeln vorgenommen.

Zur Vermittlung eines räumlichen Eindrucks werden bei vorstehenden Erosionsleisten Schlagschatten dargestellt.³³

- 32 Im unteren Bereich der Stampflage sind dabei mehr Grobkörner sichtbar, da die Verdichtung hier in der Regel weniger stark ist, sich also weniger Feinmaterial an der Schalungssinnenseite ansammelt.
- 33 Hierbei wird von einem Auftreffwinkel der Lichtstrahlen von 45° (vertikal und horizontal) ausgegangen, sodass 1 cm Leistenüberstand über die Wandoberfläche einem vertikalem Schattenwurf von 1 cm Ansichtsbreite entspricht.

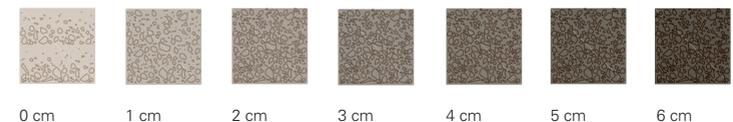


Abb. 5-45: Darstellung der Erosionstiefe (Ansichtszeichnungen im Maßstab $1:20$)

5.3.5 Katalog

Tab. 5-6 (s. u.) beinhaltet eine Auflistung der im folgenden gezeigten Studien.

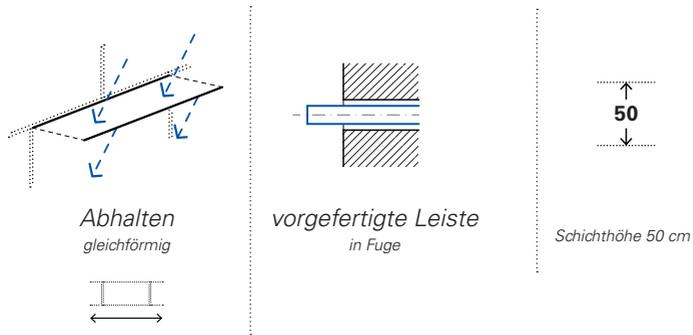
Zu allen besprochenen, primär geeigneten Typen (vgl. S. 160) wird je eine Studie gezeigt. Um auch die Herstellungweise Vv zu zeigen, ist zudem eine Studie zu Typ Bg–Vv erstellt. Weiterhin wird – zur exemplarischen Veranschaulichung des Einflusses des Steinformats – je eine Studie zu den Mauerwerks-Schichthöhen 12,5 und 25 cm (vgl. Tab. 5-4, S. 163) behandelt, sowie eine Studie zu hybrider Wirkungsweise.

Die Benennung der Studien gleicht derer der ihr zugrundeliegenden Typen, mit Ausnahme der Studien zu den Schichthöhen 12,5 und 25 cm sowie Hybridformen.

Typ	Studie	Seite
Hg–Vf	Hg–Vf	S. 188
	Hg–Vf_25	S. 194
Hu–Vf	Hu–Vf	S. 200
Lf–Vf	Lf–Vf	S. 206
Lr–Vf	Lr–Vf	S. 212
Ls–Vf	Ls–Vf/M <i>(hybride Herstellungsweise)</i>	S. 218
Bg–M	Bg–M	S. 224
	Bg–M_12,5	S. 230
Bg–Vf	Bg–Vf	S. 236
Bg–Vv	Bg–Vv	S. 242
Bu–M	Bu–M	S. 248
Bu–Vf	Bu–Vf	S. 254
Hg–Vf/Bg–Vf	Hg/Bg–Vf <i>hybride Wirkungsweise</i>	S. 260

Tab. 5-6: Übersicht Anwendungsstudien

5.3.5.1 Hg-Vf



Entwurfliche Umsetzung

Der Überstand der horizontalen Erosionsleisten über die Wandoberfläche beträgt in diesem Beispiel 25 cm ($\frac{1}{2}$ Schichthöhe). Dieses Maß ist so gewählt (60°-Regel), dass es in der Regel nur im unteren Teil der Steine, im Falle von Schlagregen mit einer großen horizontalen Komponente, noch zu geringer Erosion kommt.

Auf vertikale Erosionsleisten wird verzichtet, da die Stoßfugen durch die Auskrägung der horizontalen Leisten hinreichend geschützt sind.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 171 bzw. Abb. 5-36. Die Einbindetiefe der Leisten wurde hier vergrößert, um eine ausreichende Stabilität im eingebauten Zustand sicherzustellen (vgl. S. 176).

Gestalt

Aufgrund ihres deutlichen Überstandes ist die Leiste sehr gestaltprägend für die Fassade. Die starke Betonung der Horizontalen wird durch den Entfall vertikaler Leisten zusätzlich unterstützt. Zudem erzeugt der Schattenwurf der Leiste auf die Wandoberfläche eine große Tiefenwirkung.

Im oberen Teil der Steinlage ist von nahezu keiner Erosion auszugehen, während die Beanspruchung nach unten hin graduell zunimmt, und die Oberfläche hier im Laufe der Zeit geringfügig rauer wird.

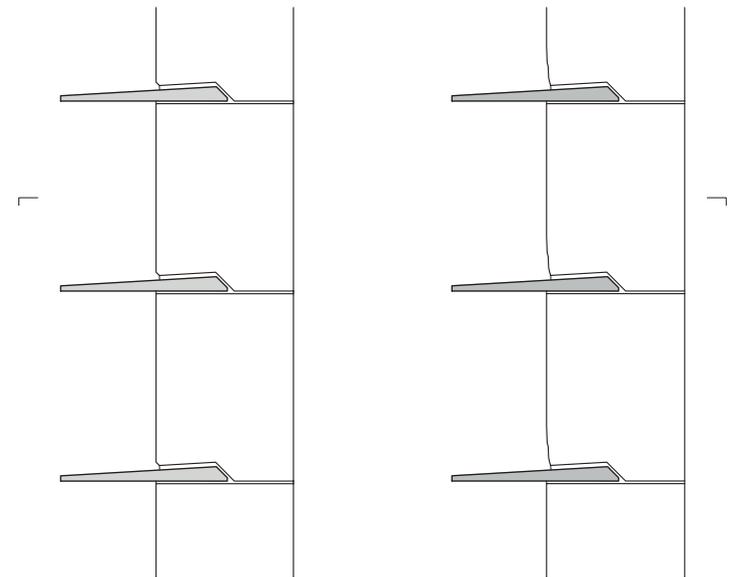


Abb. 5-46: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)



Abb. 5-47: Horizontalschnitt Zustände 1+2 (M. 1:20)



Abb. 5-48: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

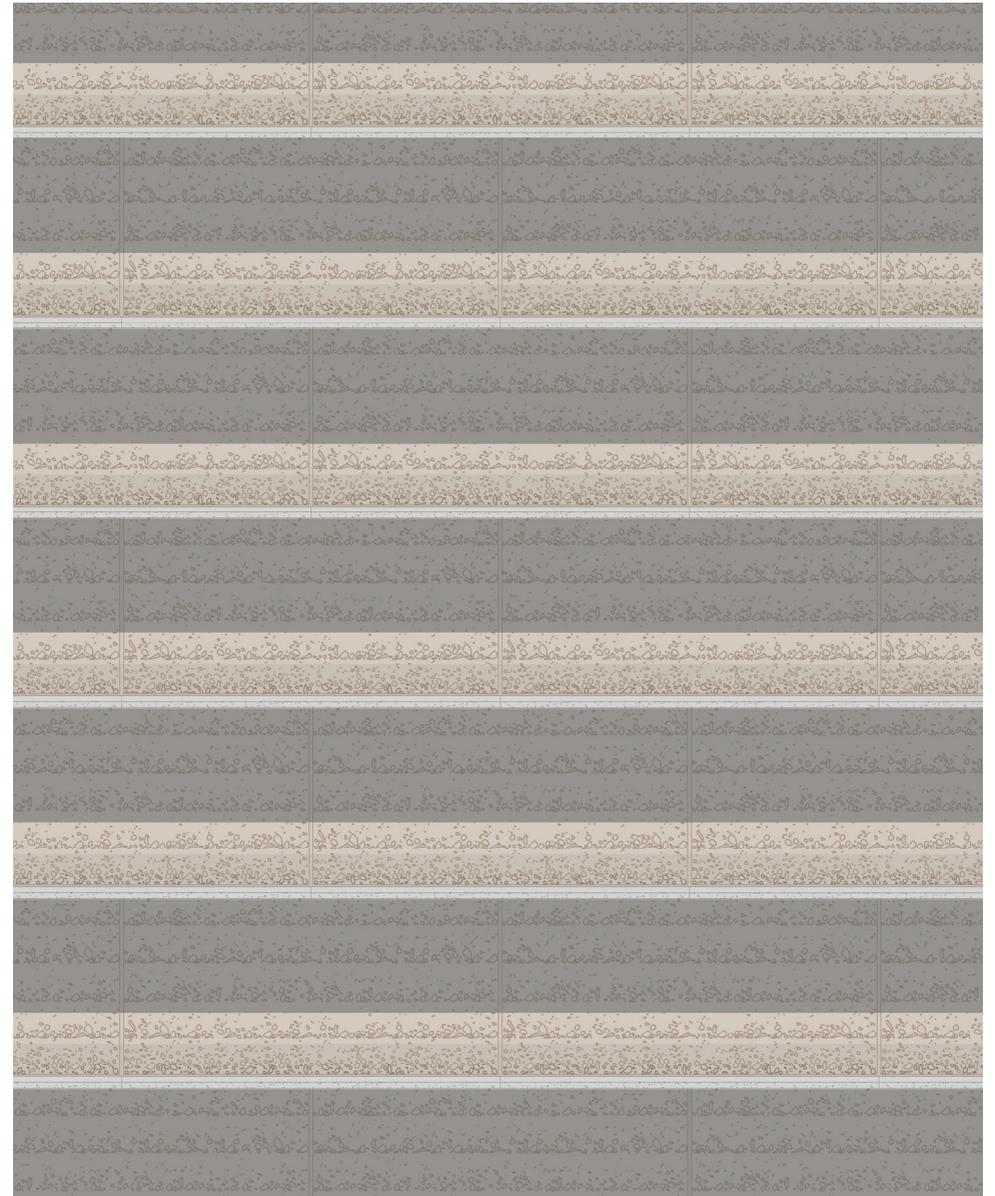
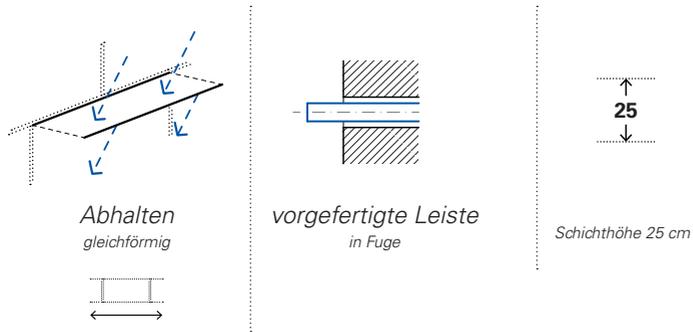


Abb. 5-49: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)



Abb. 5-50: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.2 Hg-Vf_25



Entwurfliche Umsetzung

Dieses Beispiel entspricht der Übertragung von Studie Hg-Vf (→ S. 188) auf die Mauerwerk-Schichthöhe 25 cm (Steinformat 12 DF). Auch hier sind horizontale Erosionsleisten in jeder Lagerfuge angeordnet, woraus eine Halbierung sowohl des vertikalen Leistenabstands als auch des Leistenüberstands im Vergleich mit der Schichthöhe 50 cm resultiert.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. Studie Hg-Vf, S. 188. Die Länge der Leisten-Teilstücke beträgt hier 50 cm.

Gestalt

Im Vergleich mit Studie Hg-Vf resultiert aus dem kleineren Leistenabstand und -überstand, als auch der leicht verringerten Leistenstärke, eine deutlich feingliedrigere, flächigere Fassadenansicht.

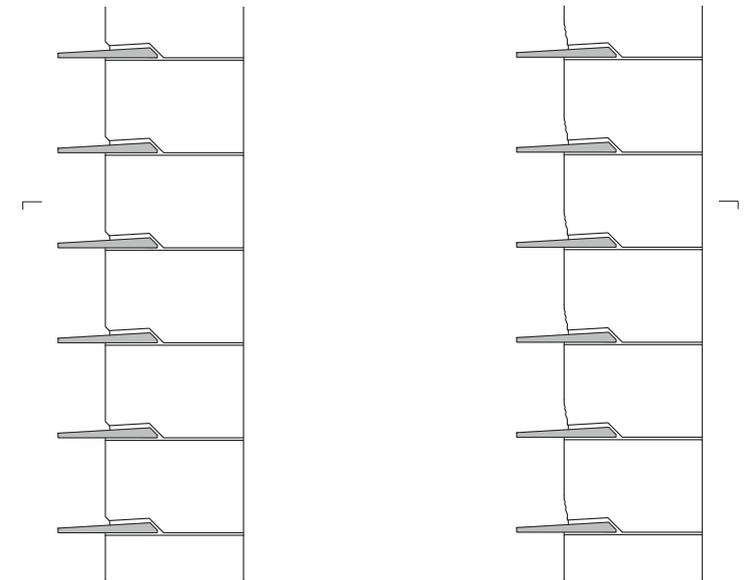


Abb. 5-51: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

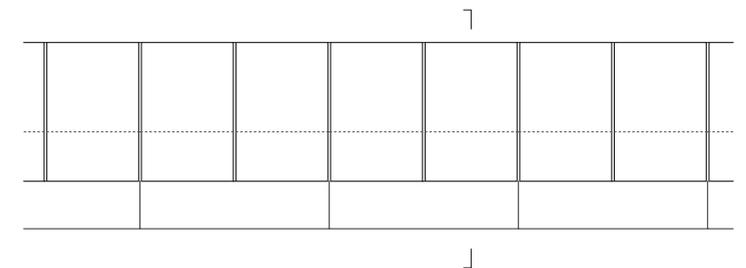


Abb. 5-52: Horizontalschnitt Zustände 1+2 (M. 1:20)

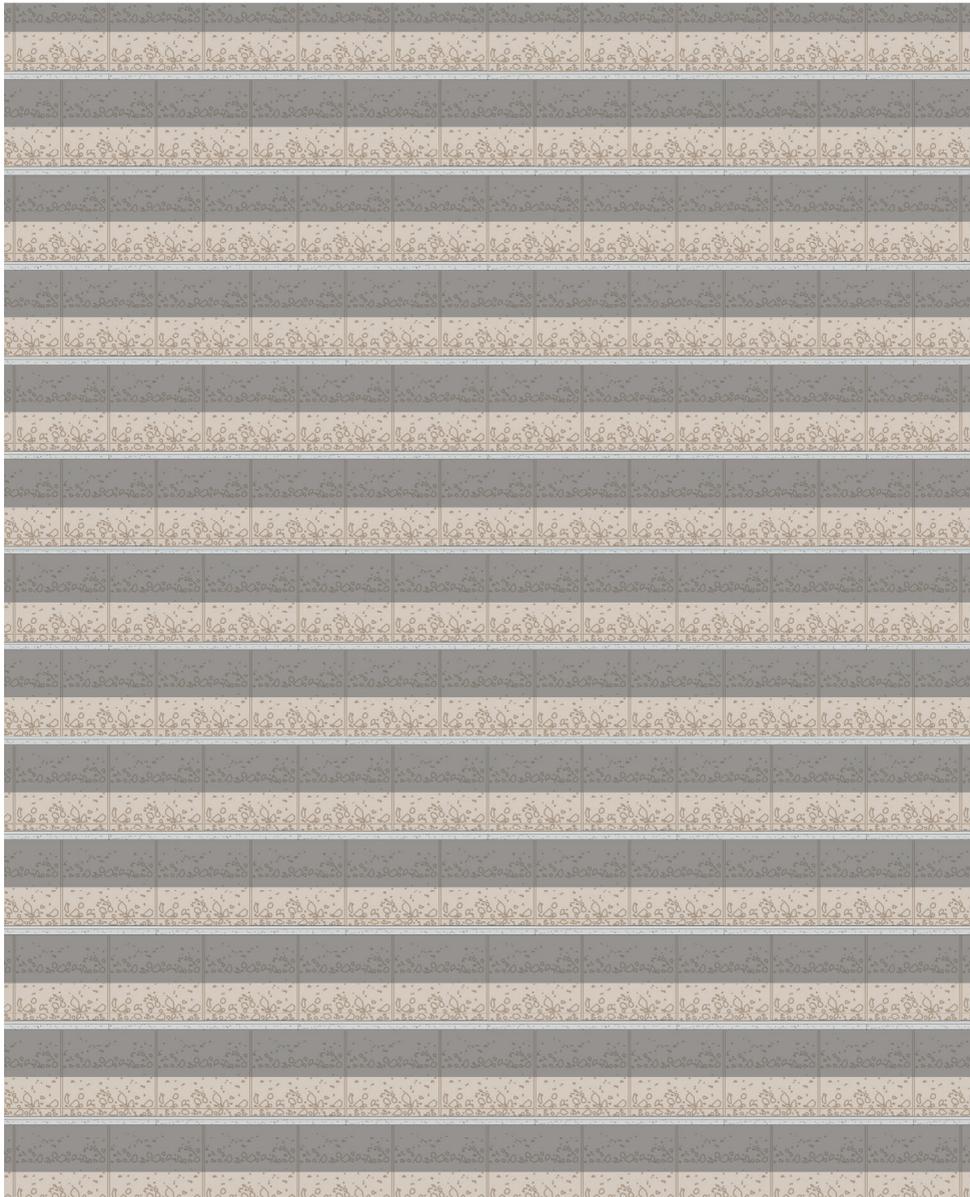


Abb. 5-53: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

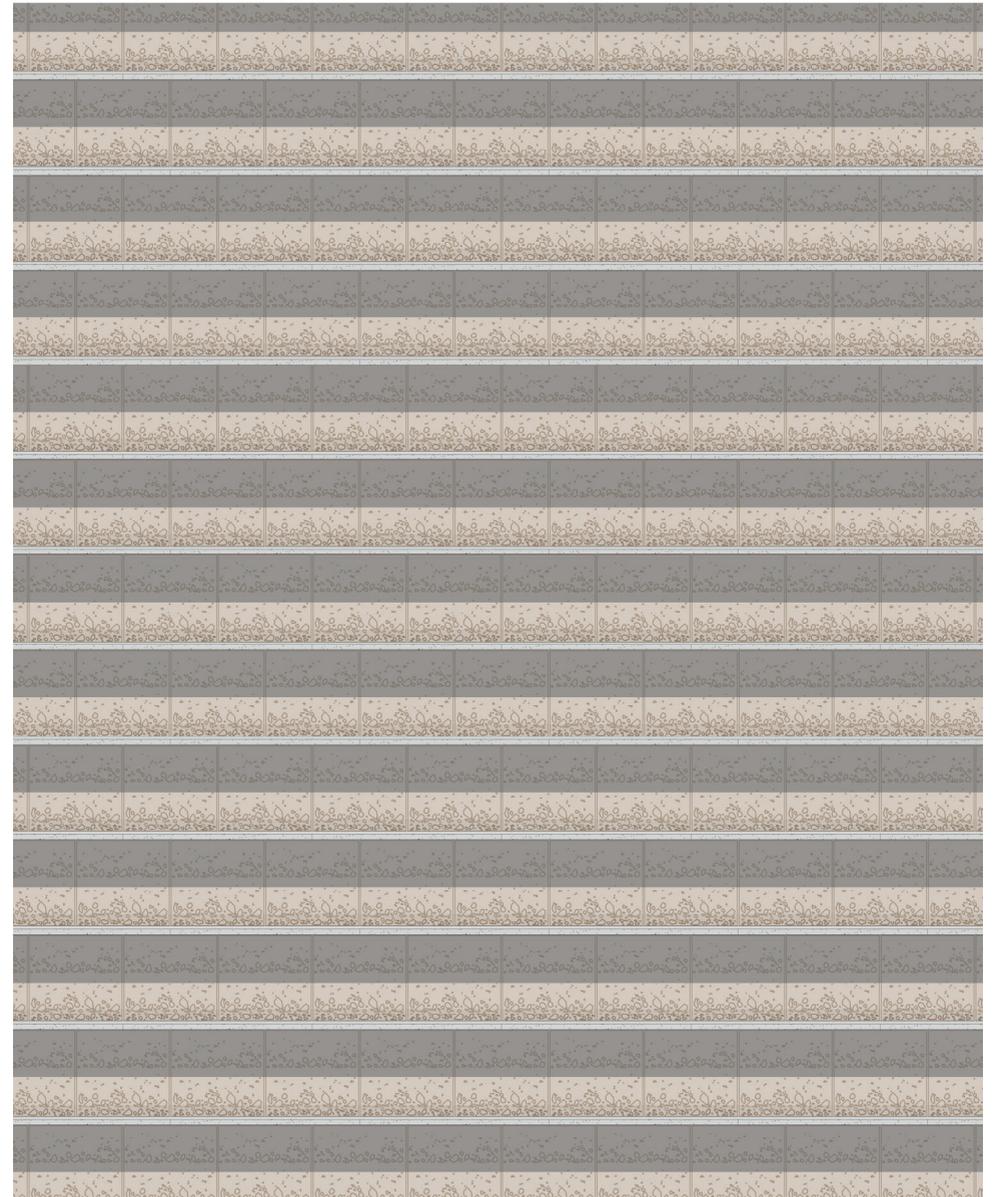


Abb. 5-54: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

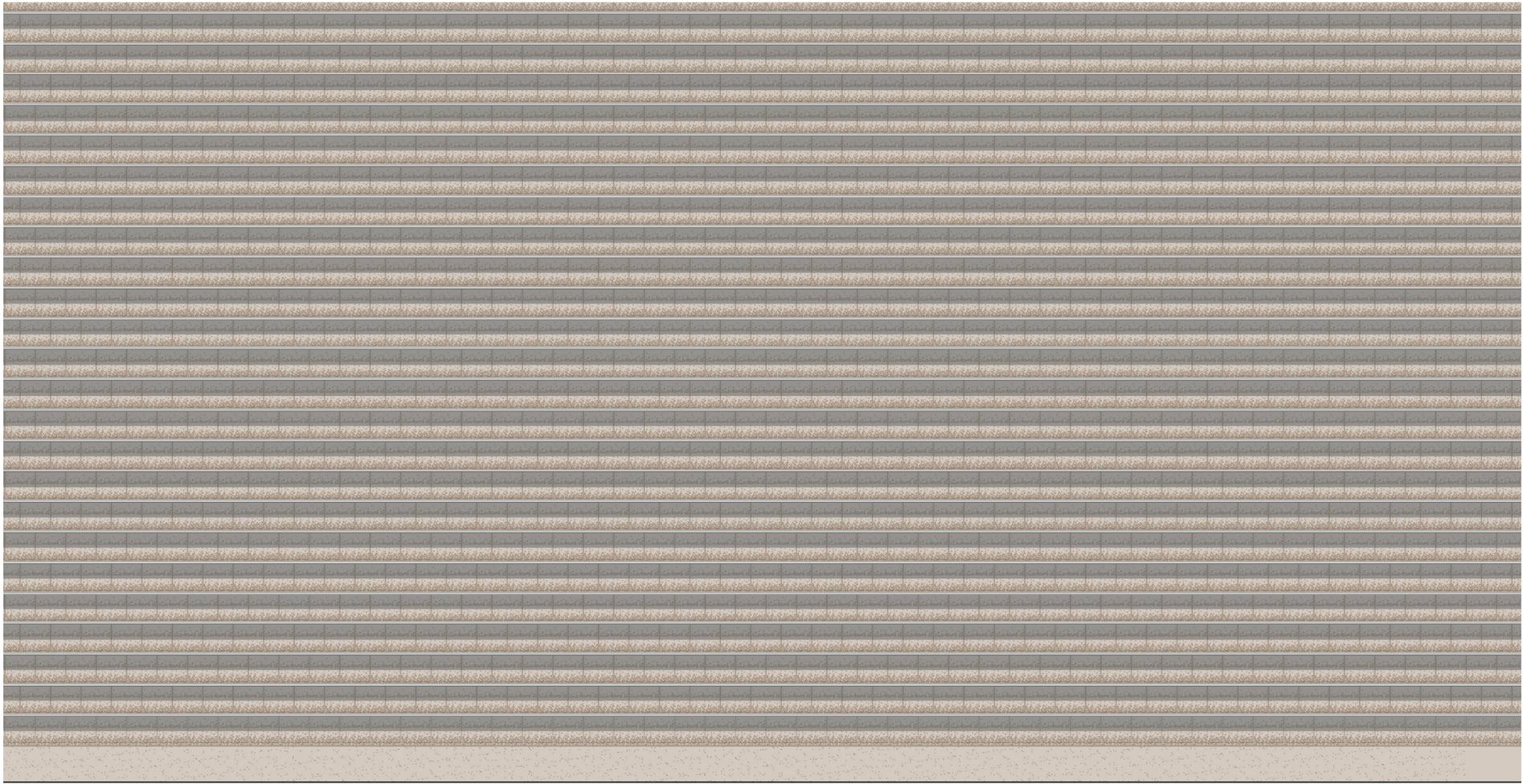
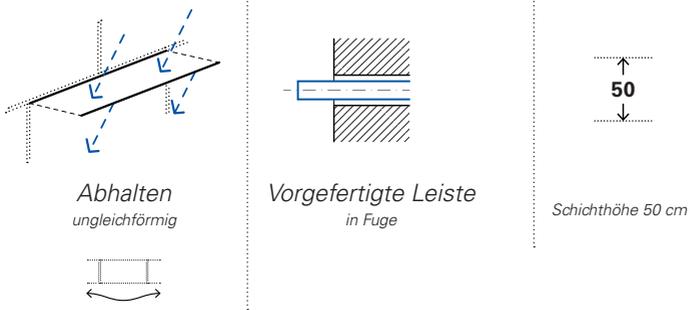


Abb. 5-55: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.3 Hu-Vf



Entwurfliche Umsetzung

Dieses Beispiel stellt eine Abwandlung von Studie Hg-Vf (→ S. 188) dar, in welcher der Leistenüberstand in Wandachse variiert wird. Die Vorderkante der Leiste vollzieht eine wellenförmige Linie entlang der Fassade, wobei der maximale Überstand im Bereich über den Stoßfugen der darunterliegenden Steinlage erreicht wird. Auf diese Weise werden lediglich die Stoßfugen im Besonderen geschützt – und somit vertikale Erosionsleisten verzichtbar –, während in Steinmitte eine höhere Erosion in Kauf genommen wird.

Konstruktive Detaillierung

vgl. Studie Hg-Vf, S. 188

Gestalt

Durch die Kurvenlinien-Form der Leisten, vor allem den Versatz dieser von Mauerwerksschicht zu Mauerwerksschicht, wird eine belebte Fassadengestalt erzeugt, welche durch den Schattwurf der Leisten noch verstärkt wird. Auch das zu erwartende, ungleichförmige Erosionsbild auf der Fassade, welches aus der Modulation des Leistenüberstandes resultiert, trägt hierzu bei.

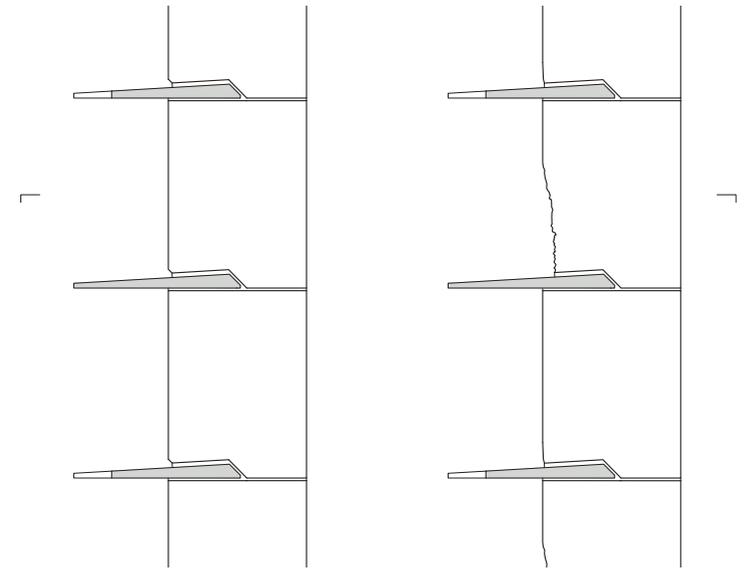


Abb. 5-56: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

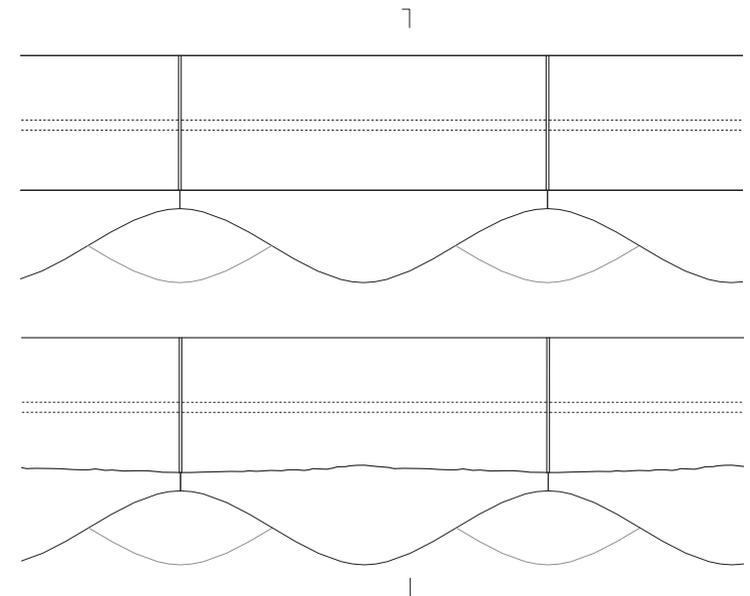


Abb. 5-57: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

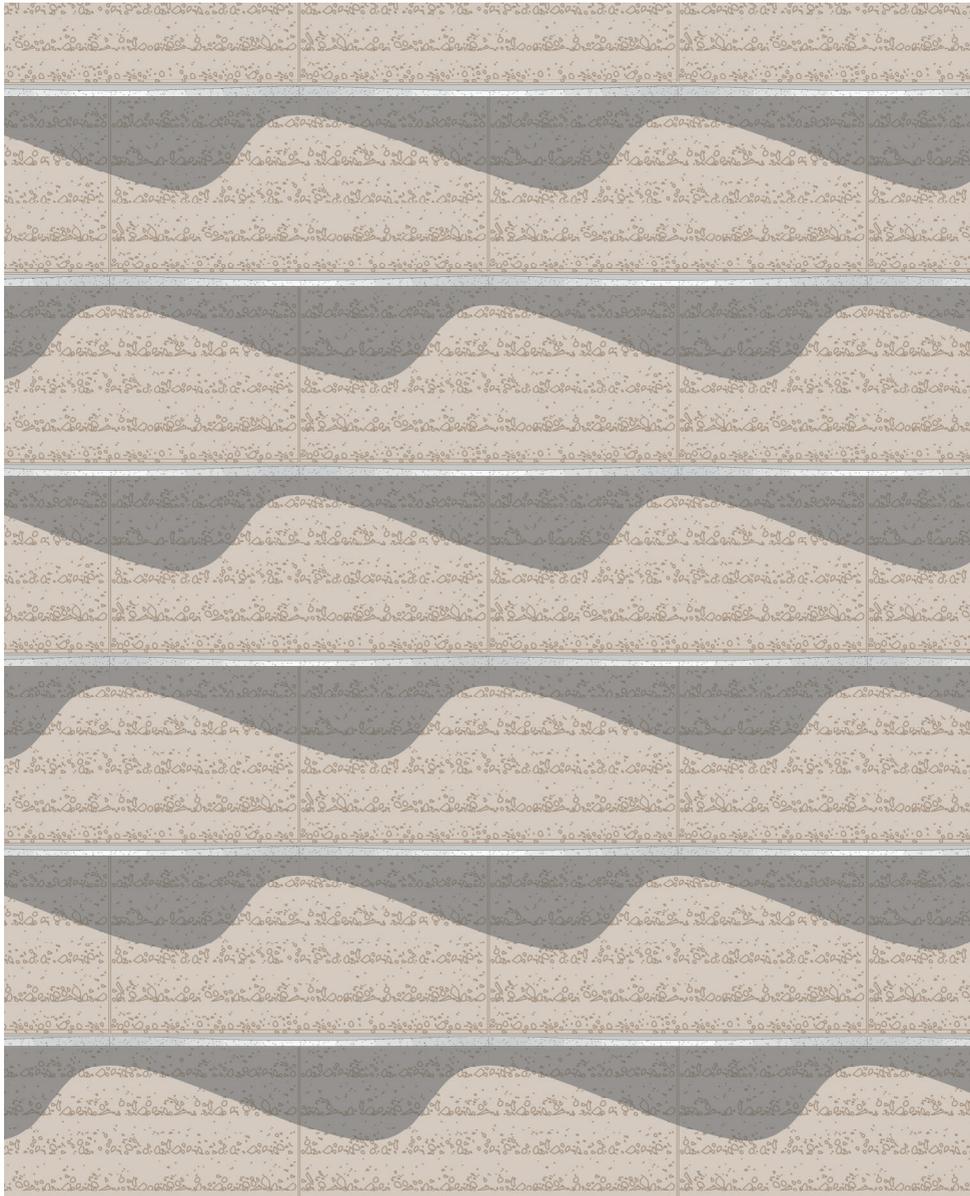


Abb. 5-58: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

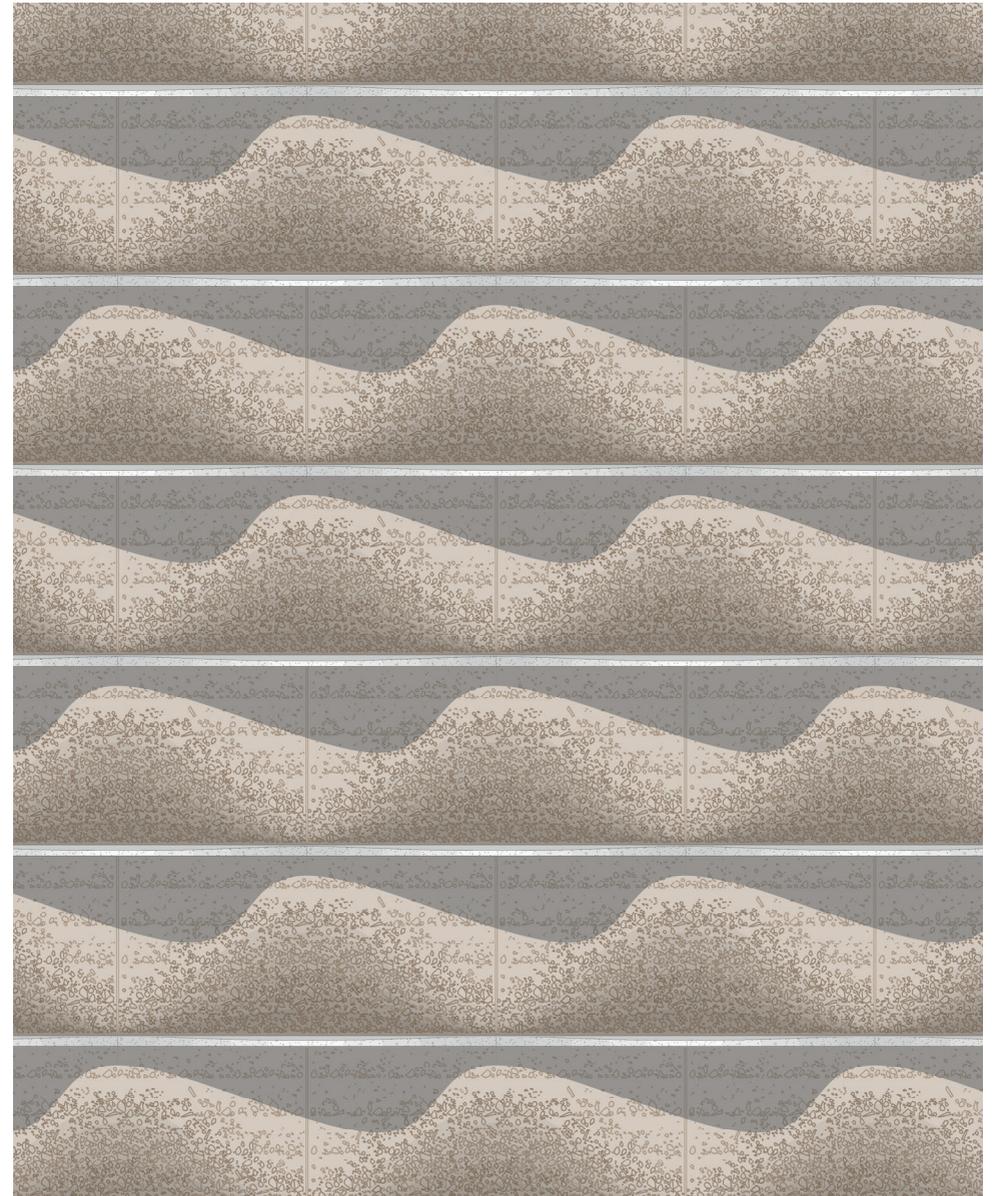


Abb. 5-59: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

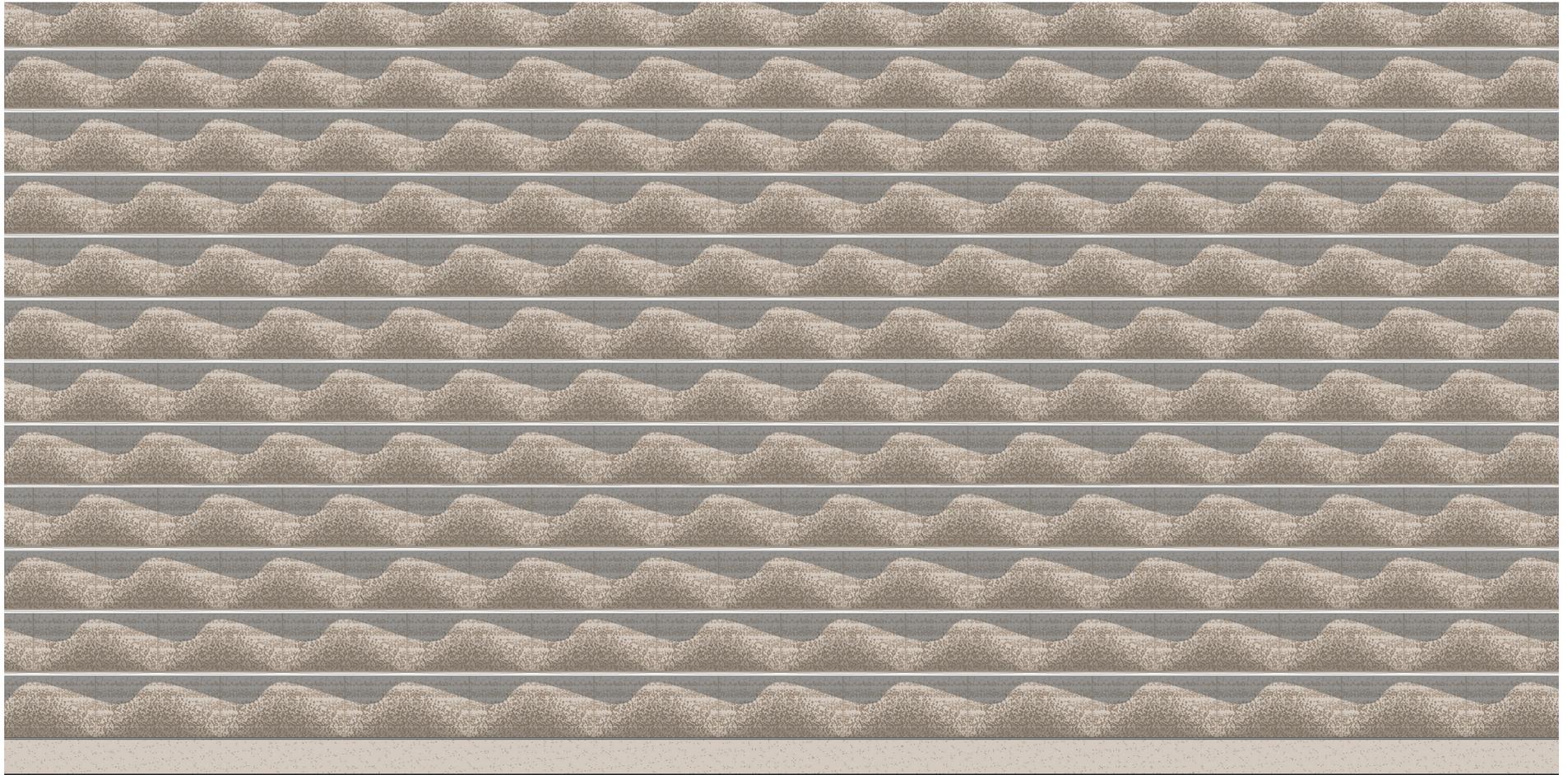
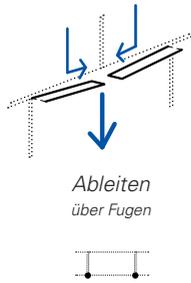
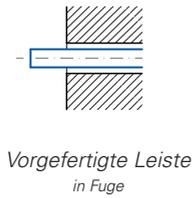


Abb. 5-60: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.4 Lf-Vf



Ableiten
über Fugen



Vorgefertigte Leiste
in Fuge

50

Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung

Sowohl der horizontale als auch vertikale Abstand der Erosionsleisten untereinander beträgt hier eine Steinbreite bzw. -höhe, es liegt also ein Elementbezug der Wirkungsweise vor. Der Stoßpunkt der horizontalen Leisten liegt jeweils auf Achse mit der vertikalen Leiste der darunter liegenden Steinlage, da sich die Einleitung des Wassers an diesem Punkt am meisten anbietet. Der Dimensionierung der Rinnenquerschnitte in Abschnitt 5.3.2.4 (S. 176 f.) folgend, wurden die vertikalen Leisten mit geringerem Überstand und vor allem schmälerer Ansichtsbreite als die horizontalen Leisten ausgebildet.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 170 f., S. 174 ff.

Gestalt

Aufgrund der notwendigen Leistenquerschnitte entstehen im Vergleich mit anderen Typen relativ große Ansichtsbreiten. Aufgrund ihres zum Betrachter hin offenen Querschnitts wirken die vertikalen Rinnen jedoch weitaus filigraner und treten optisch hinter den horizontalen zurück. So bilden auch in diesem Beispiel die horizontalen Leisten eine dominante, ruhige Grundlinie, während die vertikalen Leisten aufgelöster erscheinen. Im Vergleich mit Studie Bg-Vf (→ S. 236) wird von einem zum Wandsockel hin leicht abnehmenden Maß der Erosion ausgegangen, da die von den Steinoberflächen abzuleitende Wassermenge hier nicht kontinuierlich anwächst, die höherliegenden Mauerschichten jedoch stärker durch Erosion beansprucht sind (vgl. Abschnitt 3.3.1, S. 57).

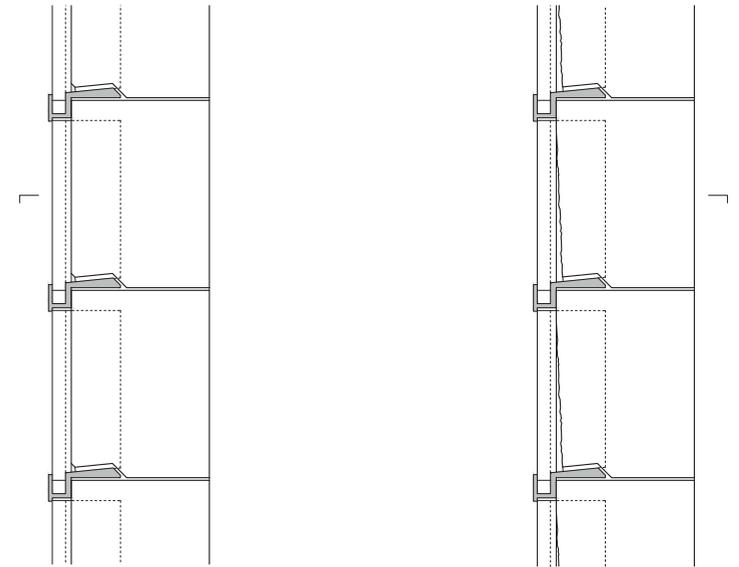


Abb. 5-61: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

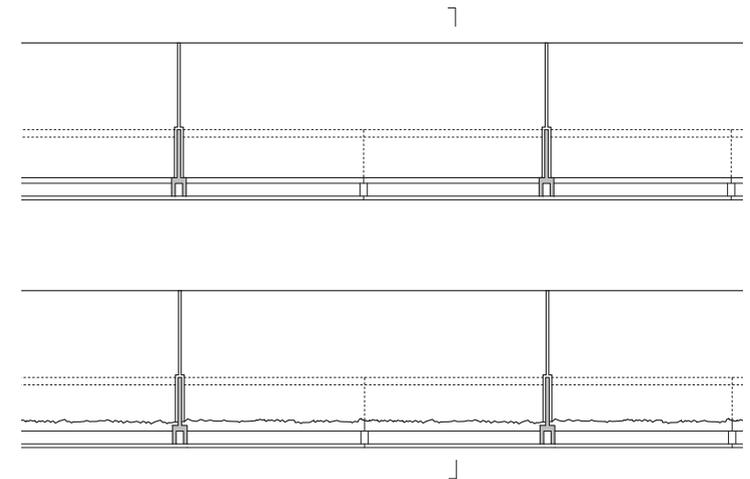


Abb. 5-62: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)



Abb. 5-63: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

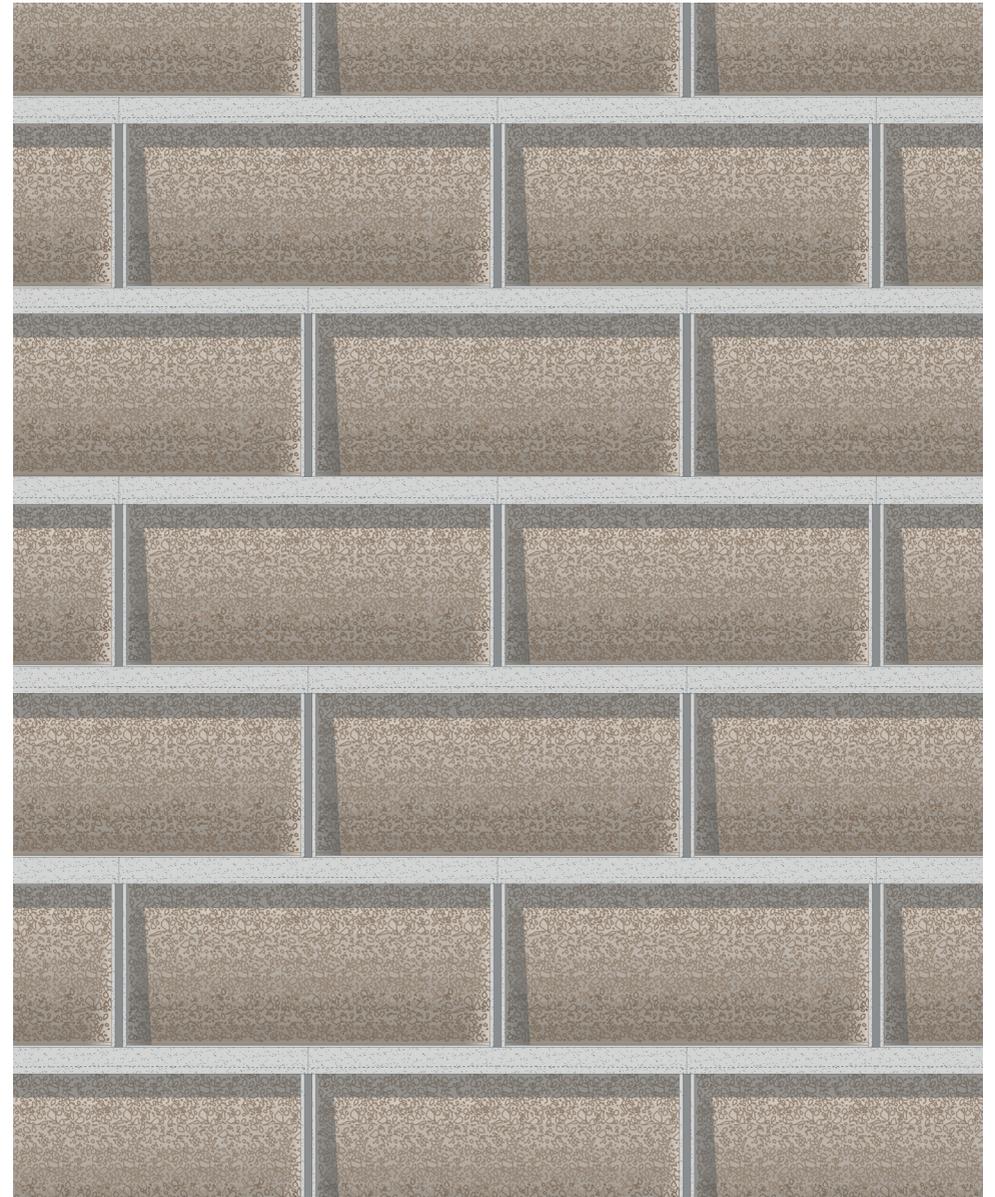


Abb. 5-64: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

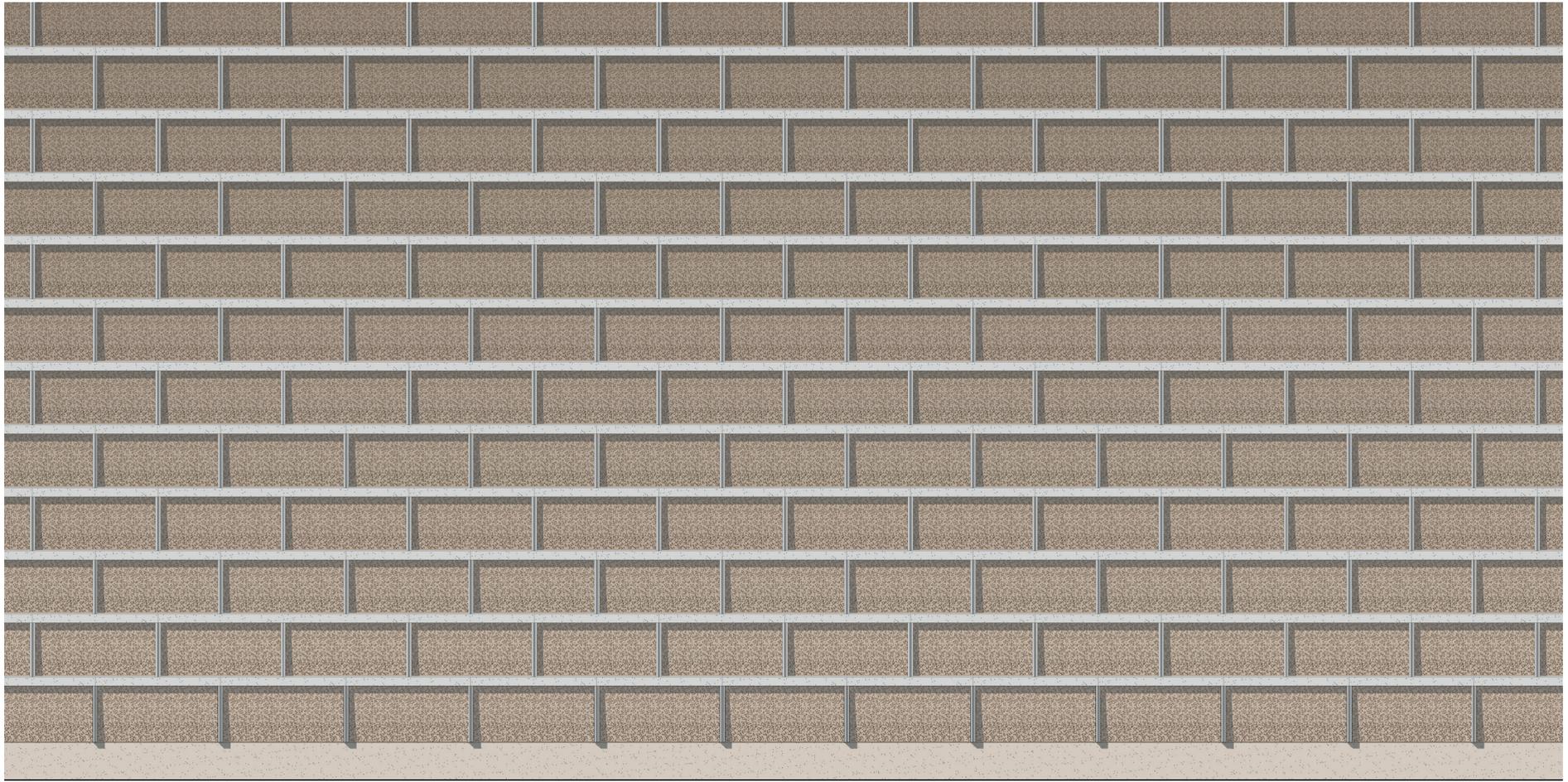
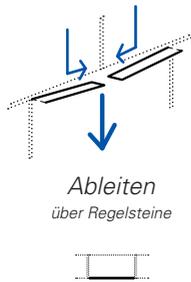
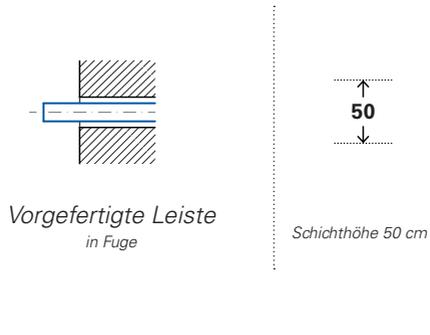


Abb. 5-65: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.5 Lr-Vf



Ableiten
über Regelsteine



Vorgefertigte Leiste
in Fuge

Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung

Für dieses Beispiel wird die prinzipiell gleiche horizontale Leiste wie in Studie Lf-Vf (→ S. 206) verwendet. Auch hier liegt ein Elementbezug der Wirkungsweise vor. Da die abzuleitenden Wassermengen identisch mit Studie Lf-Vf sind, wird auch die Dimensionierung des Rinnenquerschnitts übernommen. Jedoch werden die Leisten hier auf gleicher Linie mit dem Stoß der darüber liegenden Steinlage gefügt, und am Stoßpunkt eine Öffnung zur Weiterleitung des Wassers nach unten vorgesehen.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 178 f.

Gestalt

Vor allem durch den Einfluss der Erosion ergeben sich besondere gestalterische Merkmale. Es wird davon ausgegangen, dass sich im Bereich der gebündelten Wasserführung auf den Lehmsteinen mit der Zeit Rinnen ausbilden, deren Tiefe – aufgrund der stetigen Vergrößerung der abzuleitenden Wassermenge zum Wandsockel hin – von Mauerwerksschicht zu Mauerwerksschicht zunimmt. Darüber hinaus wird vermutet, dass sich die Rinnen zum unteren Steinrand leicht aufweiten, da hier von einer erhöhten Erosion durch Spritzwasser auszugehen ist.

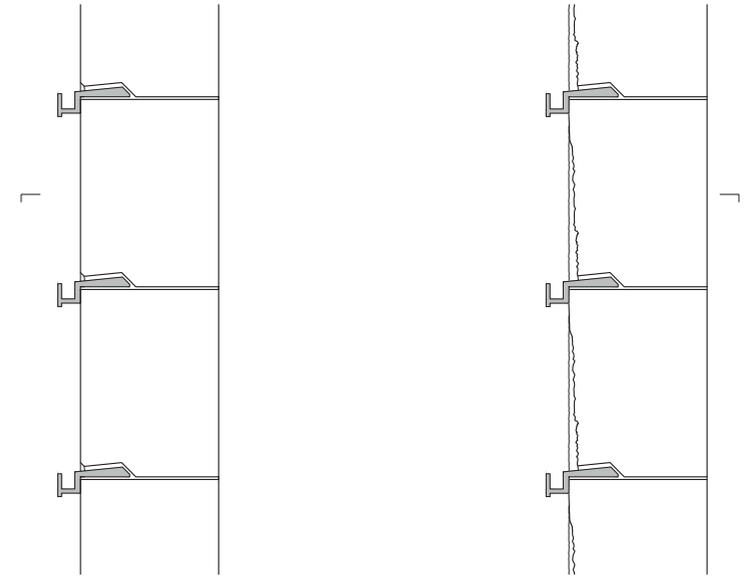


Abb. 5-66: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

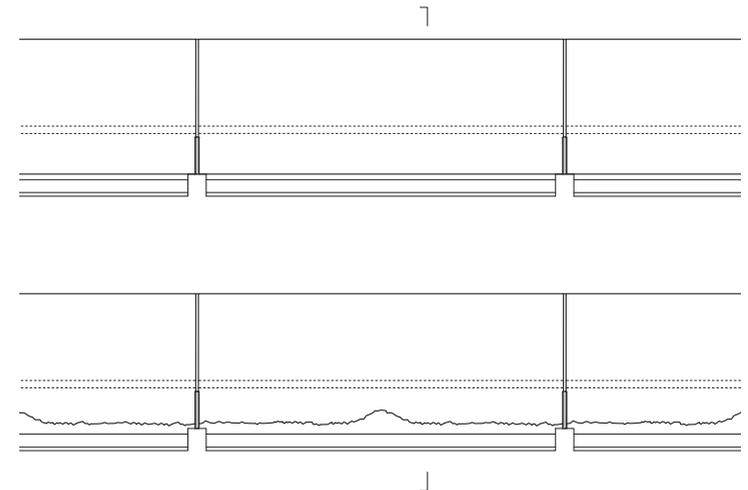


Abb. 5-67: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

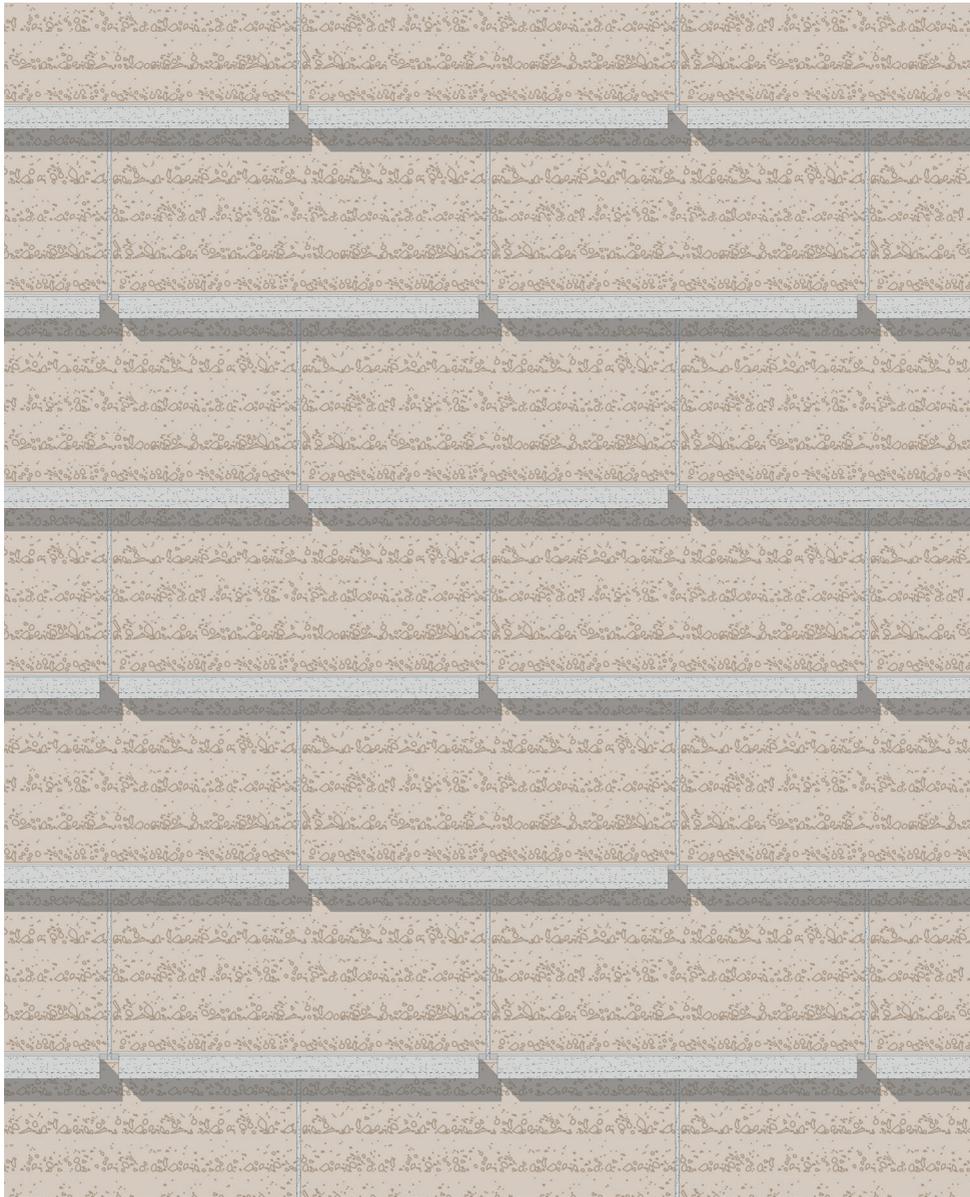


Abb. 5-68: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

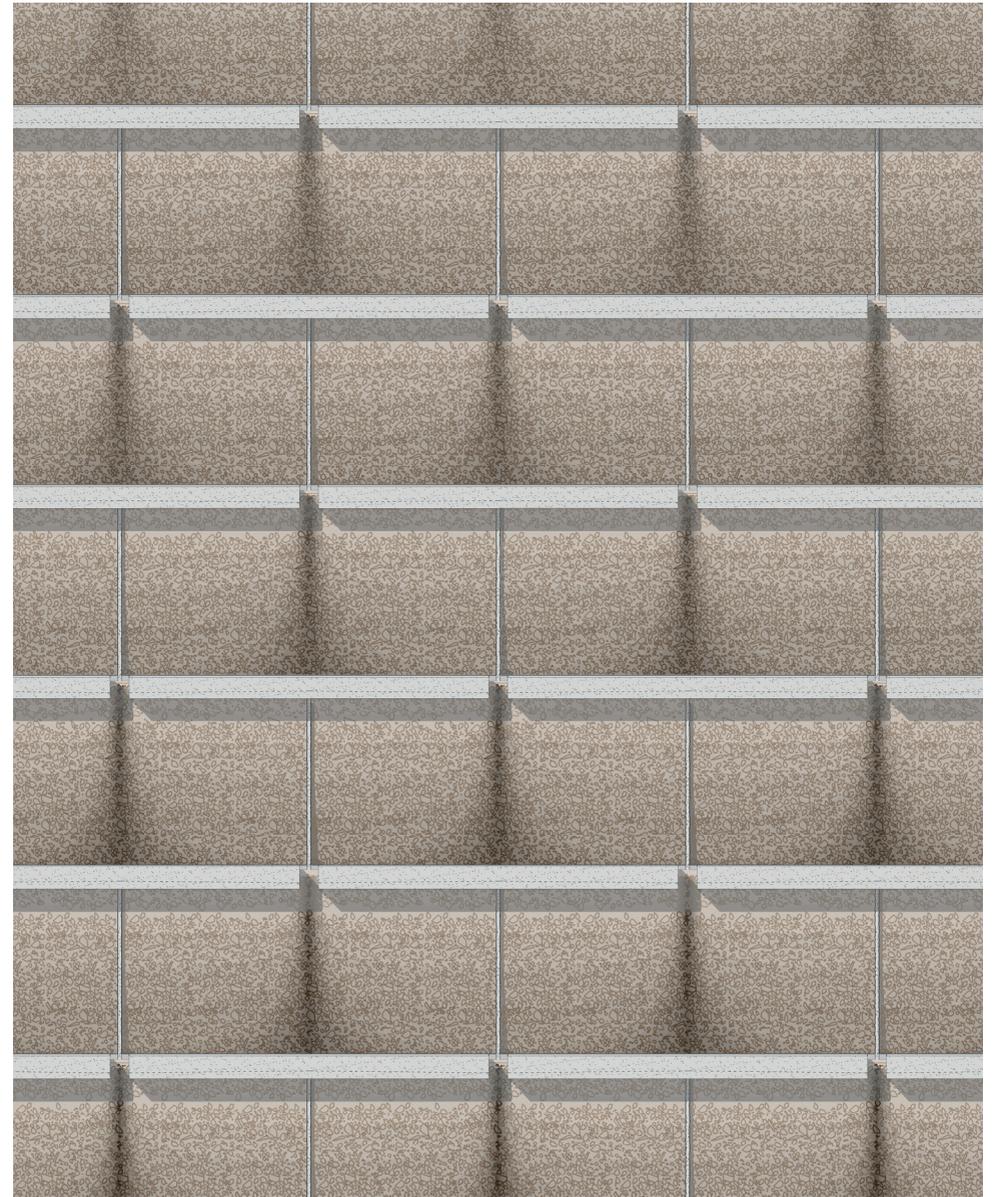


Abb. 5-69: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

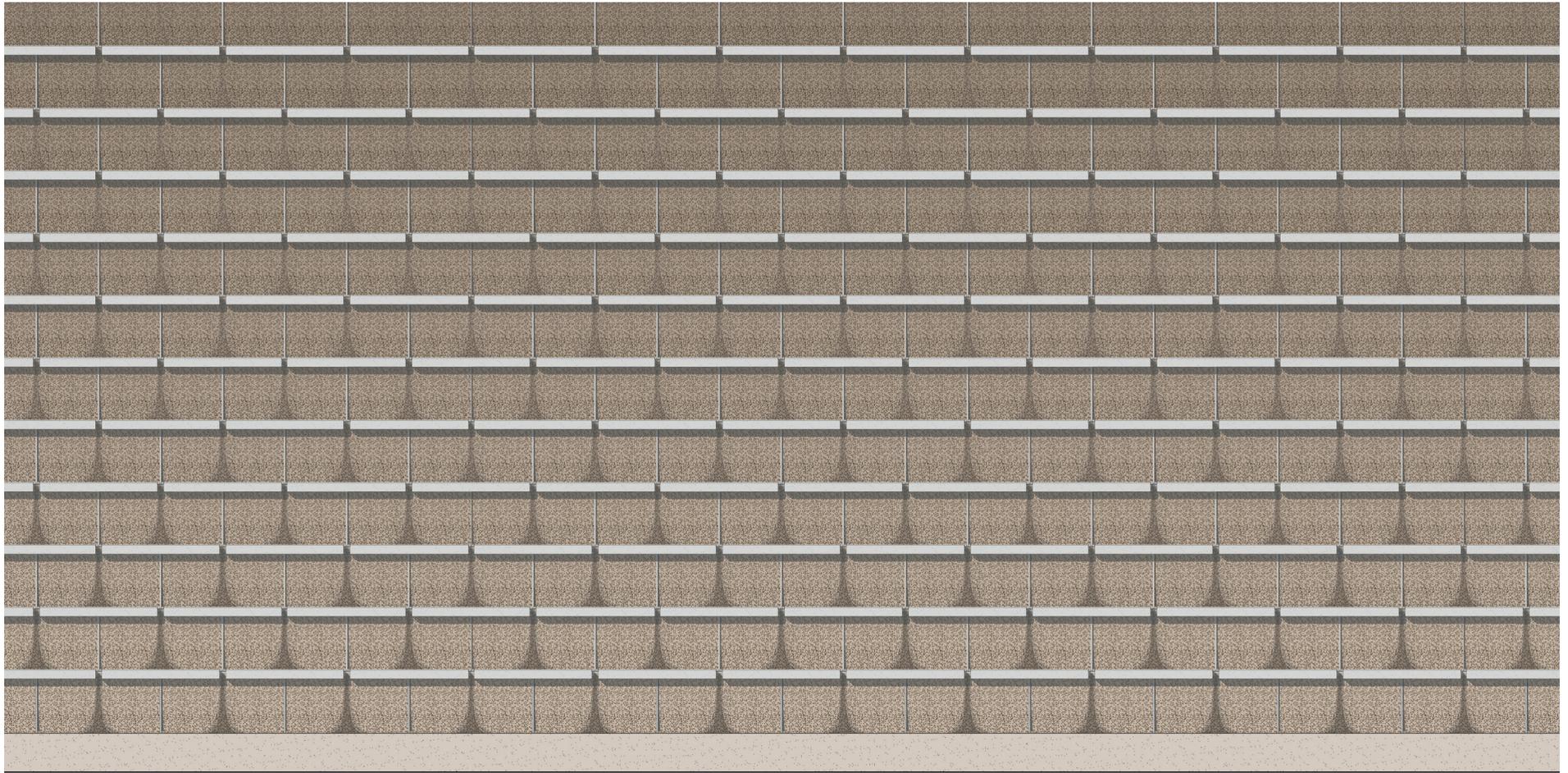
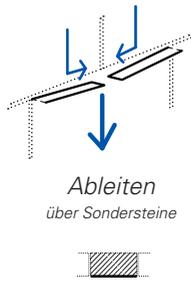
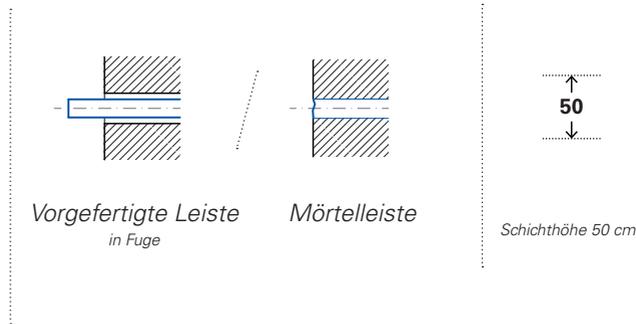


Abb. 5-70: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.6 Ls-Vf/M



Ableiten
über Sondersteine



Vorgefertigte Leiste
in Fuge

Mörtelleiste

Schichhöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung

In diesem Beispiel ist das Ableiten über Sondersteine so umgesetzt, dass sich für die Anzahl benötigter Regelsteine und Sondersteine, also stabilisierter Steine, ein Verhältnis von 2:1 ergibt. Da sich die Wirkungsweise somit über zwei Module (Steinbreiten) erstreckt, besteht hier kein Elementbezug (vgl. S. 152). Ein seitlicher Überstand der Leisten gewährleistet, dass das Wasser nicht entlang der empfindlicheren Randbereiche des Steines bzw. der Stoßfuge nach unten fließt.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 178 f.. Da die horizontalen Leisten im Vergleich mit Studie Lr-Vf (→ S. 212) die doppelte Wassermenge führen, beträgt der freie Rinnenquerschnitt hier 50 x 50 mm. Es werden zwei verschiedene Leisten-Teilstücke (mit Gefälle in unterschiedlicher Richtung) benötigt. Da die Leisten nicht mit den Sondersteinen verbunden werden, sondern lediglich seitlich auskragen, ist keine Aussparung in den Sondersteinen erforderlich.

Gestalt

Durch den deutlichen Abstand der Leisten zueinander, sowie deren Versatz von Steinlage zu Steinlage, entsteht eine Fassadengestalt von individuellem Charakter. Deren Wirkung wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Oberflächen der Regelsteine mit der Zeit rauer werden, während die der Sondersteine weitgehend glatt bleiben.

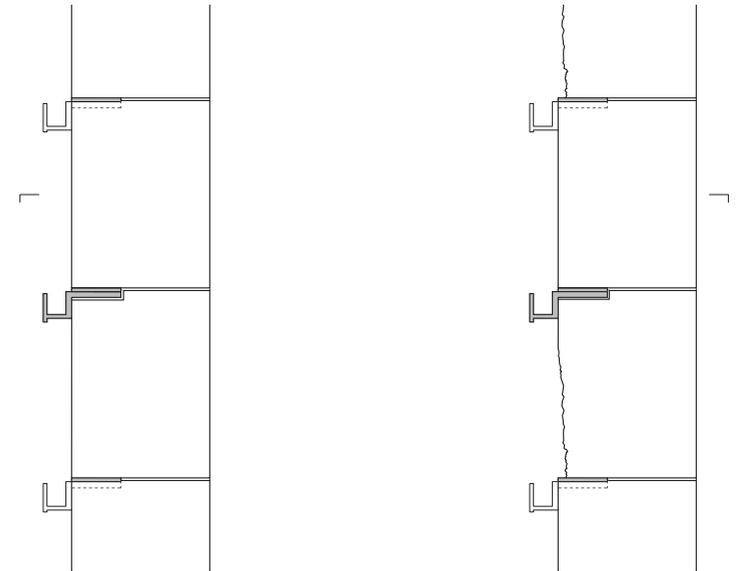


Abb. 5-71: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

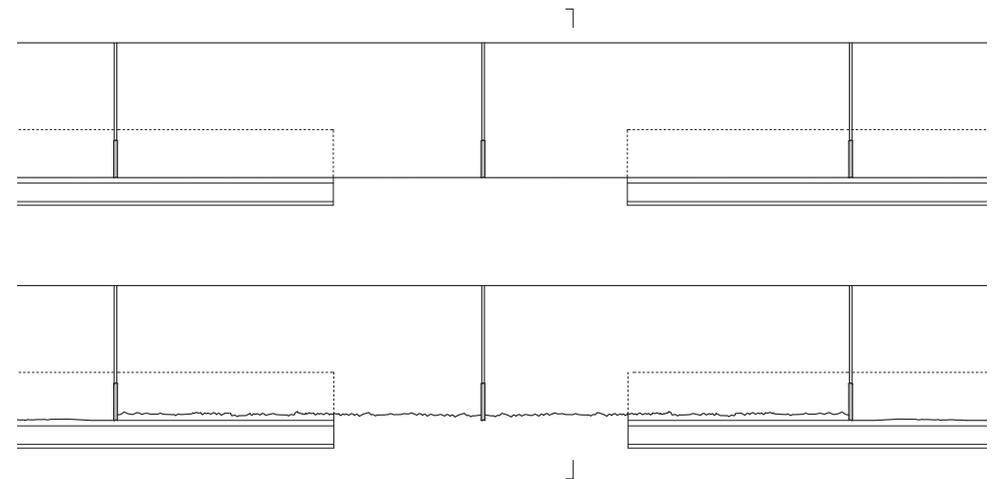


Abb. 5-72: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

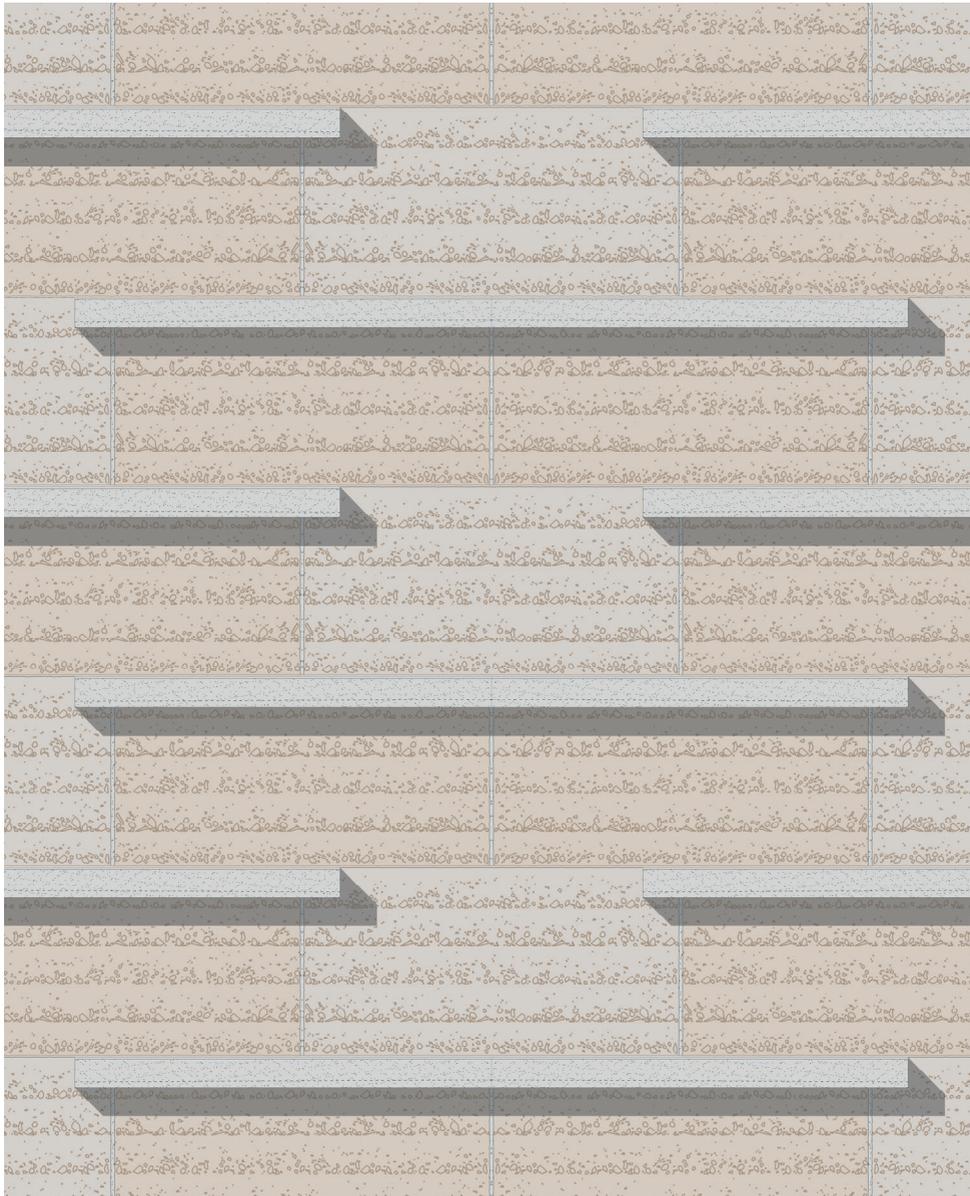


Abb. 5-73: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

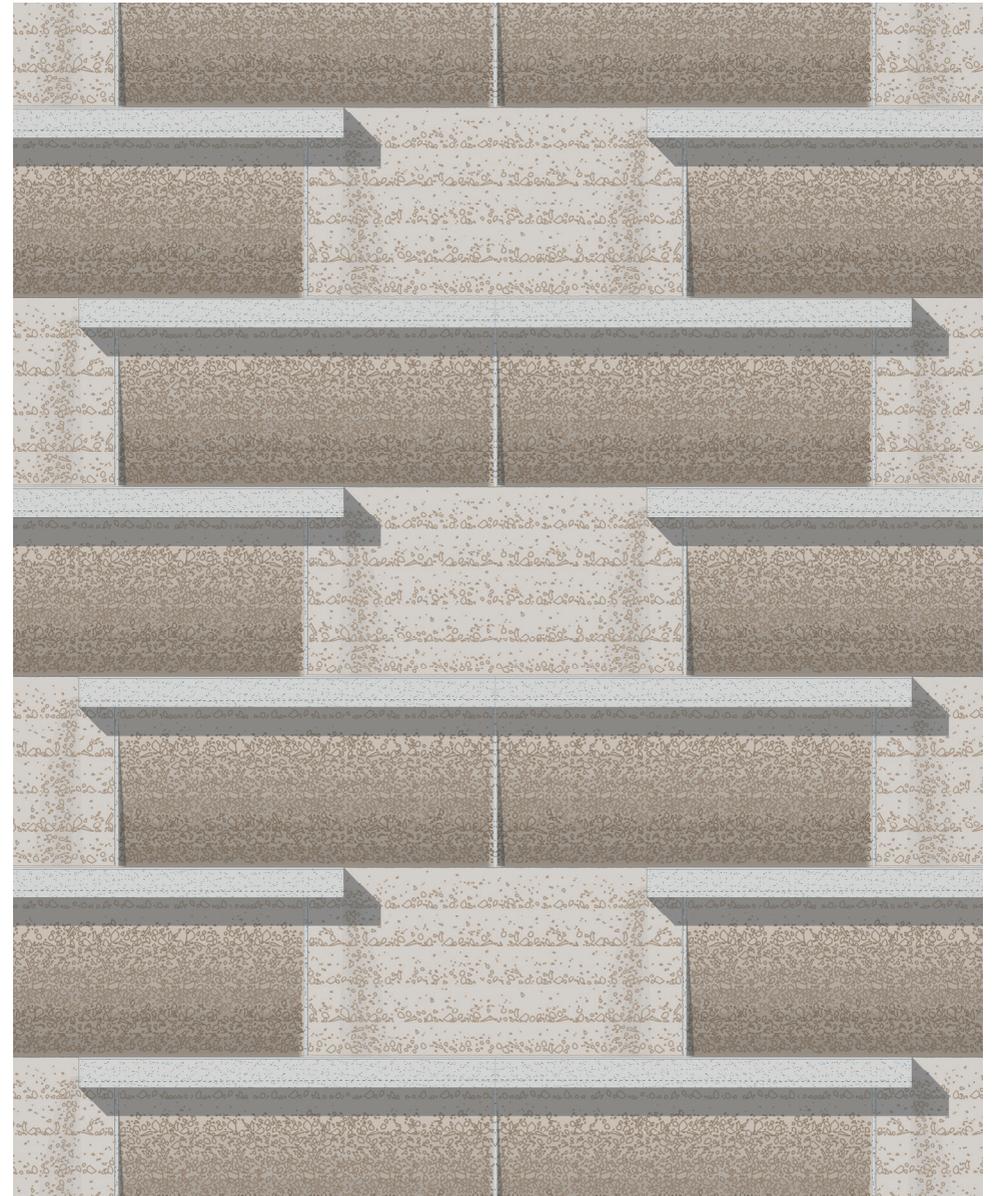


Abb. 5-74: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

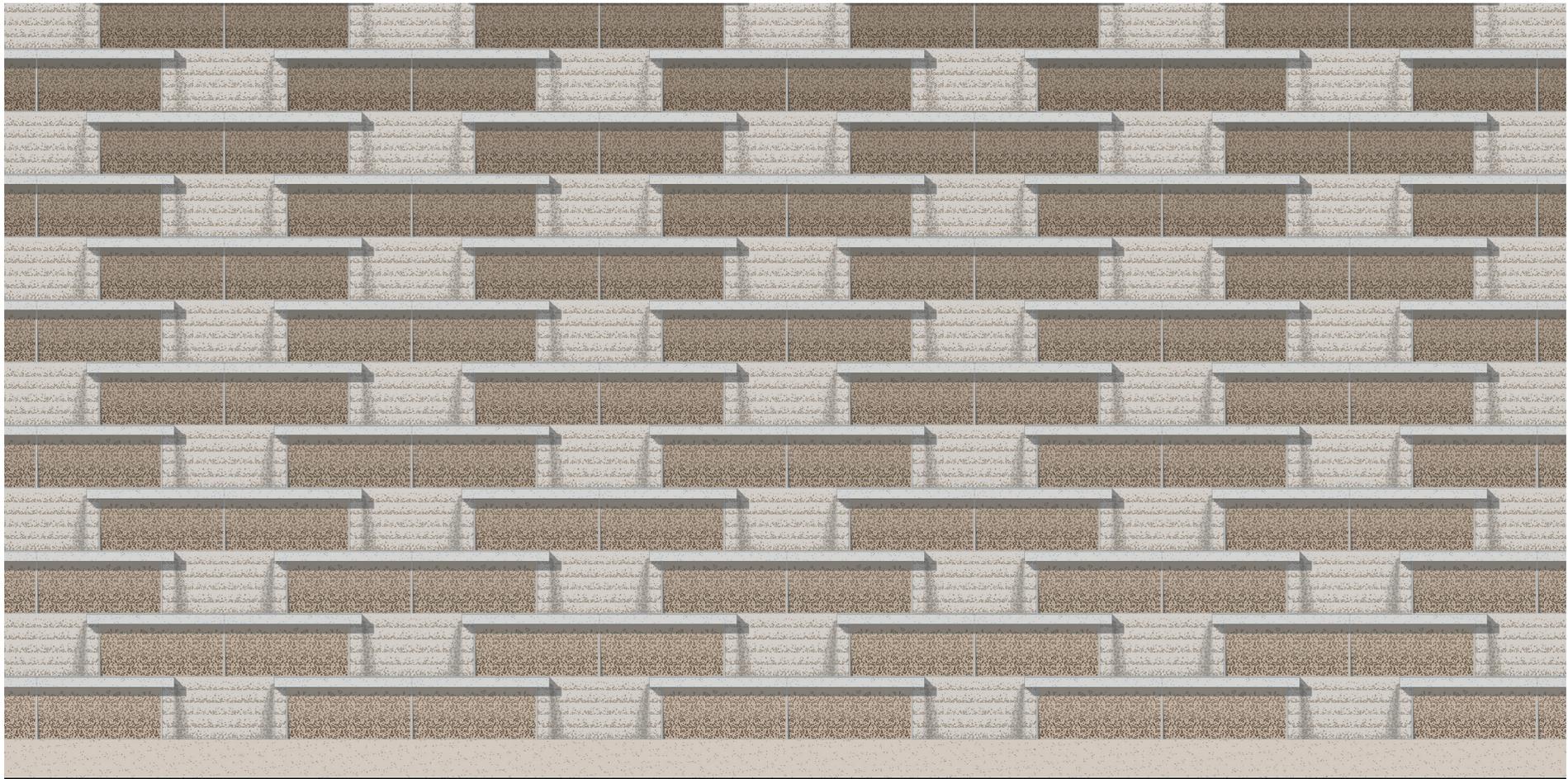
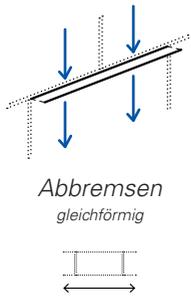
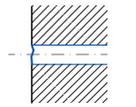


Abb. 5-75: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.7 Bg-M



Abbremsen
gleichförmig



Mörtelleiste

50

Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung
(Vgl. S. 164)

Konstruktive Detaillierung
Vgl. S. 168 bzw. Abb. 5-32

Gestalt

Aufgrund ihrer geringen Ansichtsbreite zeichnen sich die horizontalen Leisten hier relativ filigran auf der Fassade ab. Ähnlich wie in Studie Lf-Vf (→ S. 206) treten sie damit gegenüber den vertikalen Leisten vergleichsweise gering hervor. Das Erscheinungsbild der Wand erinnert sowohl an heute übliche Erosionsbremsen in monolithischen Stampflehmwänden, als auch an die stärkere Untergliederung der Wandfläche in der Horizontalen, welche charakteristisch für einige traditionelle Techniken ist (vgl. S. 140).

Durch die immer stärkere Freilegung der Leisten aufgrund der fortschreitenden Erosion entsteht eine Art Kassettenierung der Wandoberfläche. Dabei ist wegen der zu erwartenden, etwas geringeren Erosion im Bereich der vertikalen Leisten (jeweils Abschirmung zu einer Seite bei nicht-orthogonalem Auftreffen des Regens), von einer leicht konvexen Formung der Teilflächen auszugehen.

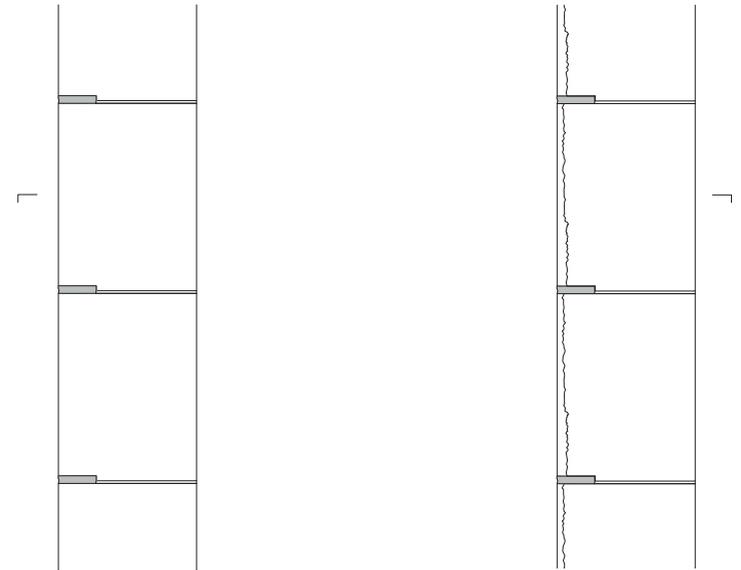


Abb. 5-76: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

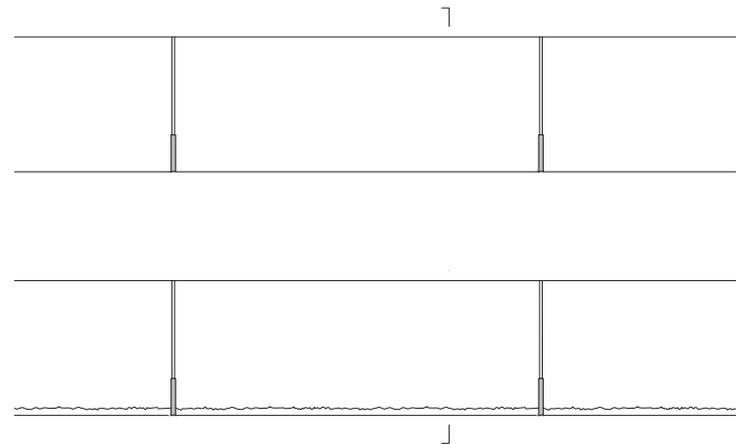


Abb. 5-77: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

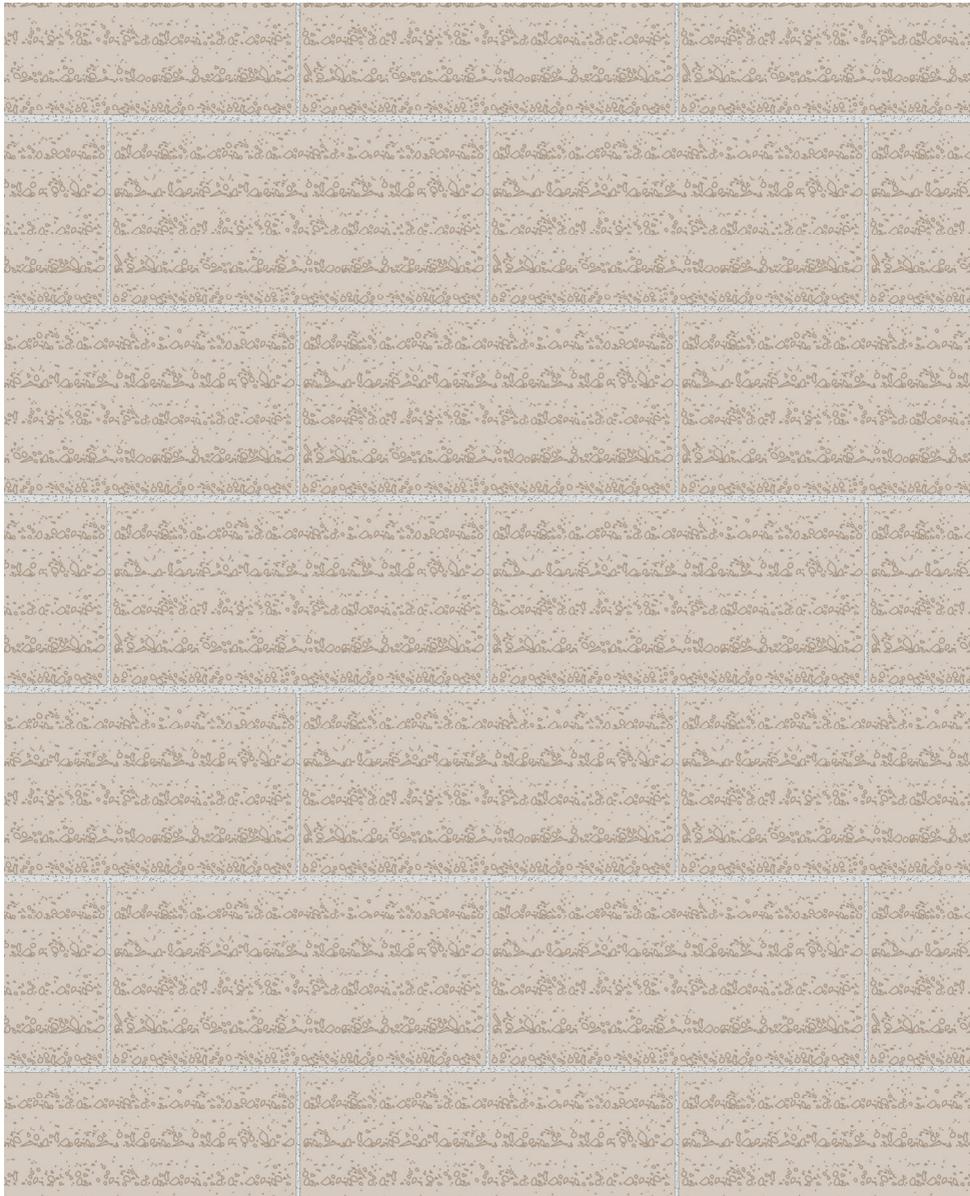


Abb. 5-78: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

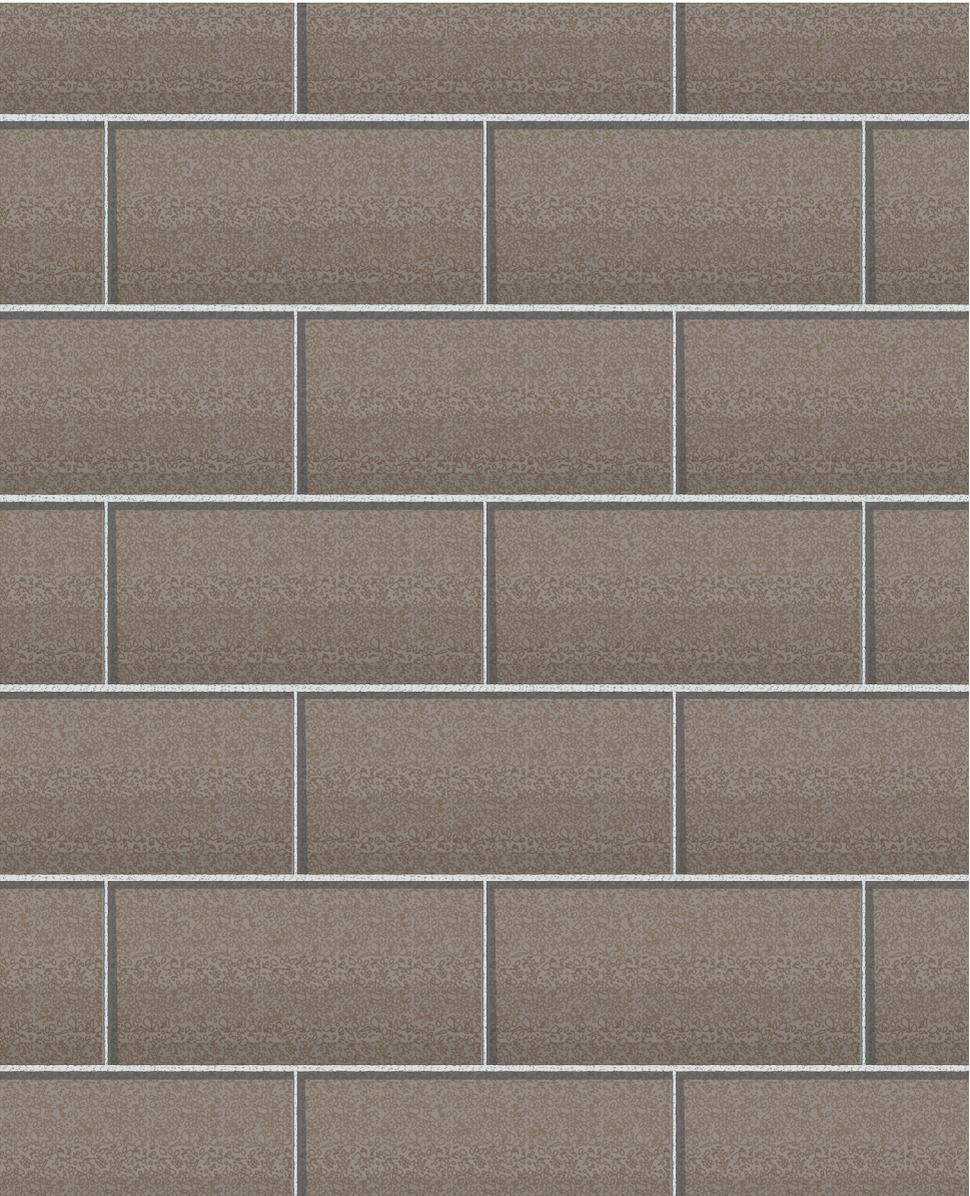


Abb. 5-79: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

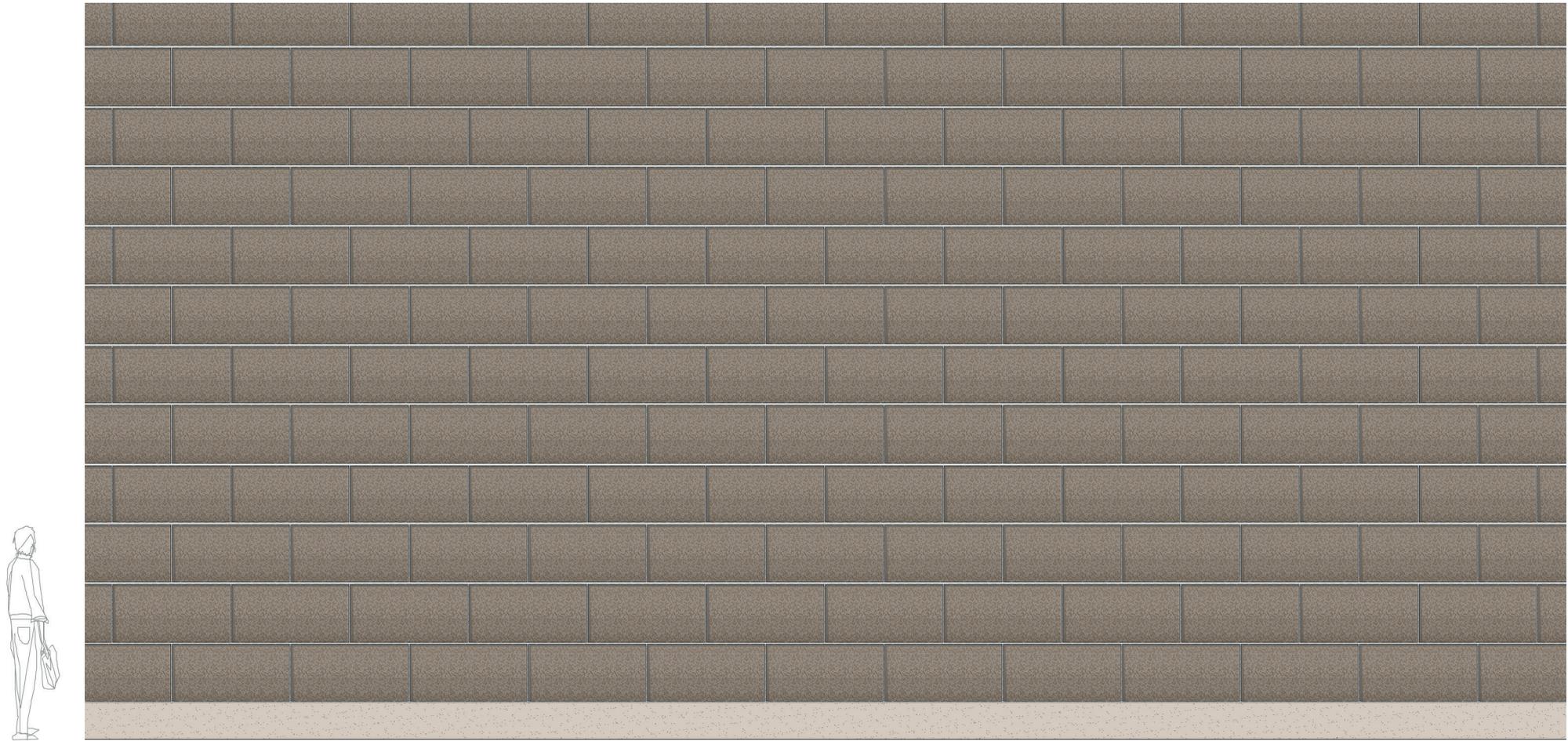
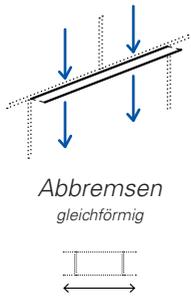
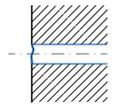


Abb. 5-80: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.8 Bg-M_12,5



Abbremsen
gleichförmig



Mörtelleiste

12,5

Schichthöhe
12,5 cm

Entwurfliche Umsetzung

Analog zu Studie Bg-M (→ S. 224) wird in diesem Beispiel der Einsatz von Erosionsleisten aus Kalkmörtel in kleinformatigem Verbandsmauerwerk (Steinformat 2DF) gezeigt. Es ähnelt somit der in Kap. 1 erwähnten Arbeit von Judd (vgl. S. 17).

Die Stärke der horizontalen Leisten beträgt hier lediglich 1 cm, da der Abstand der Lagerfugen so gering ist, dass im Falle des Versagens einer Leiste (z. B. aufgrund von Brüchigkeit) die der darunter liegende Steinlage die Bremsfunktion übernehmen kann.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 168 bzw. Abb. 5-32

Gestalt

Durch die geringe Fugenstärke ergibt sich ein sehr filigranes Fugenbild. Horizontale und vertikale Fugen bilden zusammen ein feines Netz von Linien, welches die Fassade überzieht. Dabei heben sich die Fugen durch ihre unterschiedliche Textur und Farbigkeit von den Stampflehm-Steinen ab.

Im Laufe der Zeit werden die Vorderkanten der Fugen immer stärker freigelegt, wodurch die Oberfläche an Tiefe gewinnt. Dabei ist anzunehmen, dass die vertikalen Steinränder etwas weniger stark erodieren als die Steinmitte, da sie durch die hervorstehenden Stoßfugen geschützt werden.

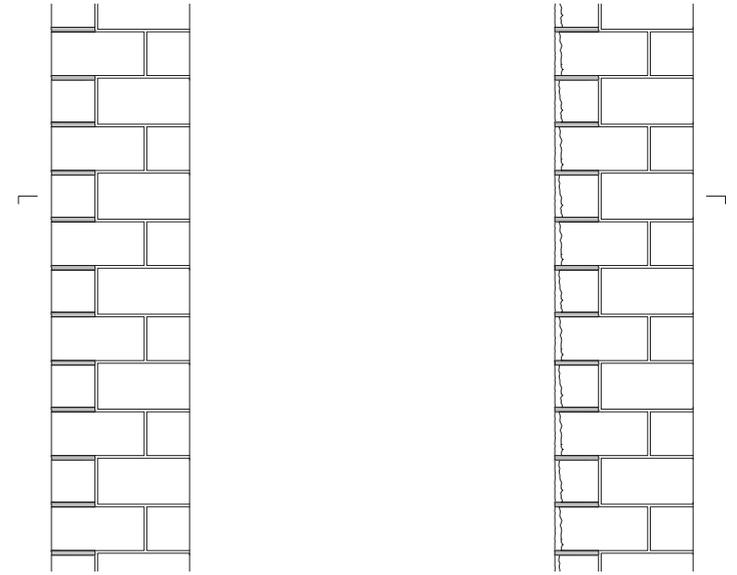


Abb. 5-81: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

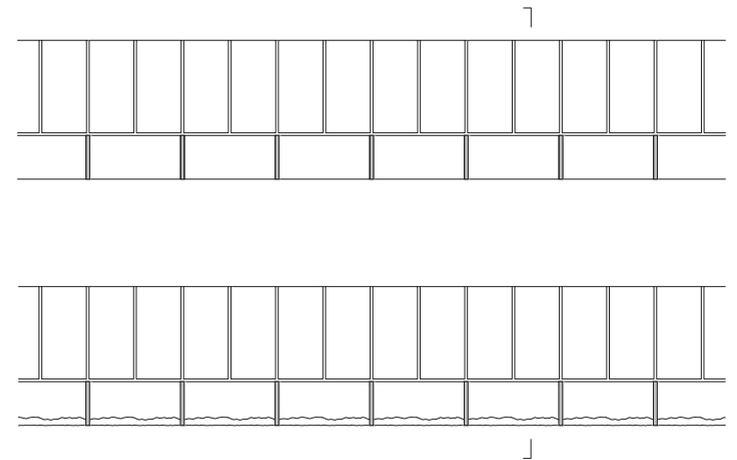


Abb. 5-82: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

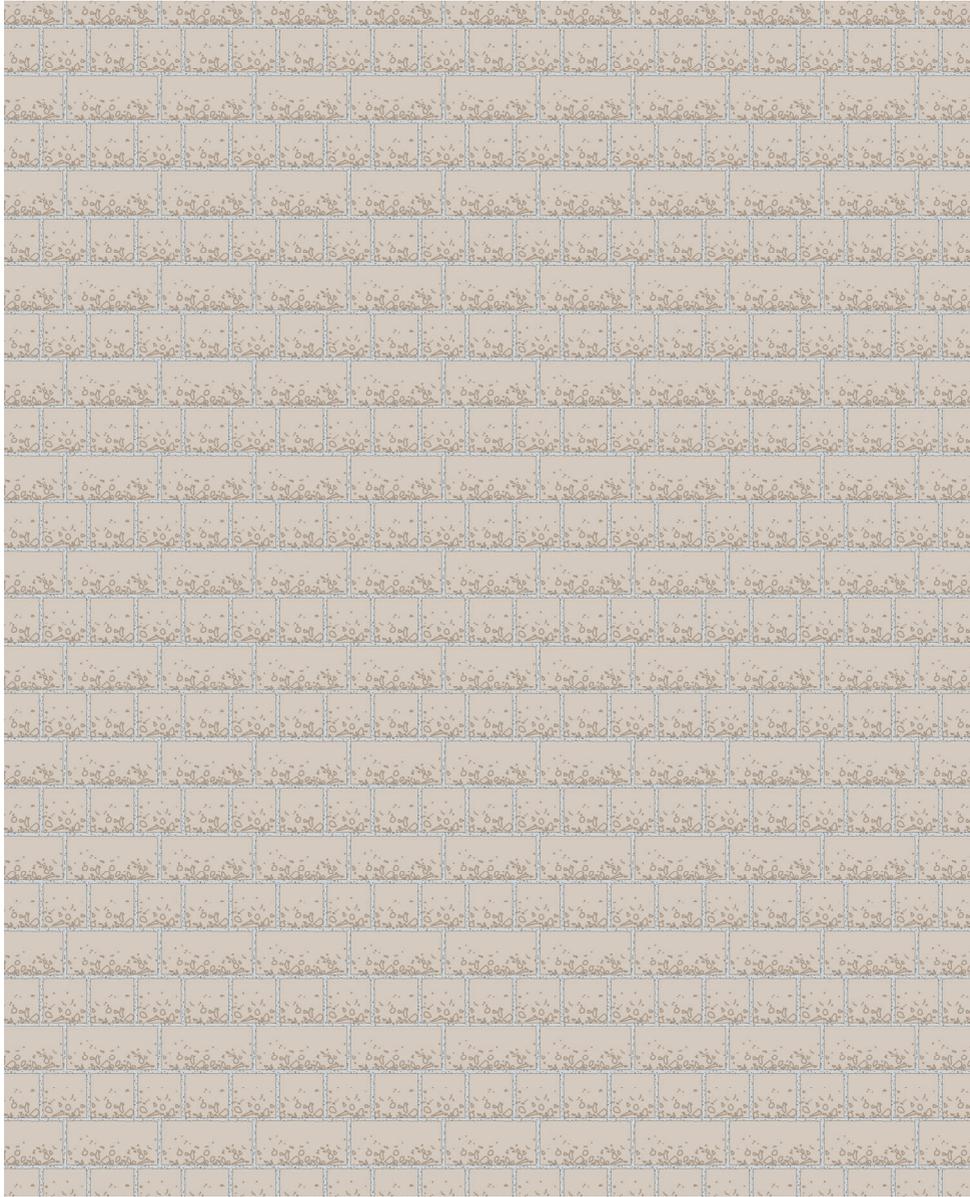


Abb. 5-83: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

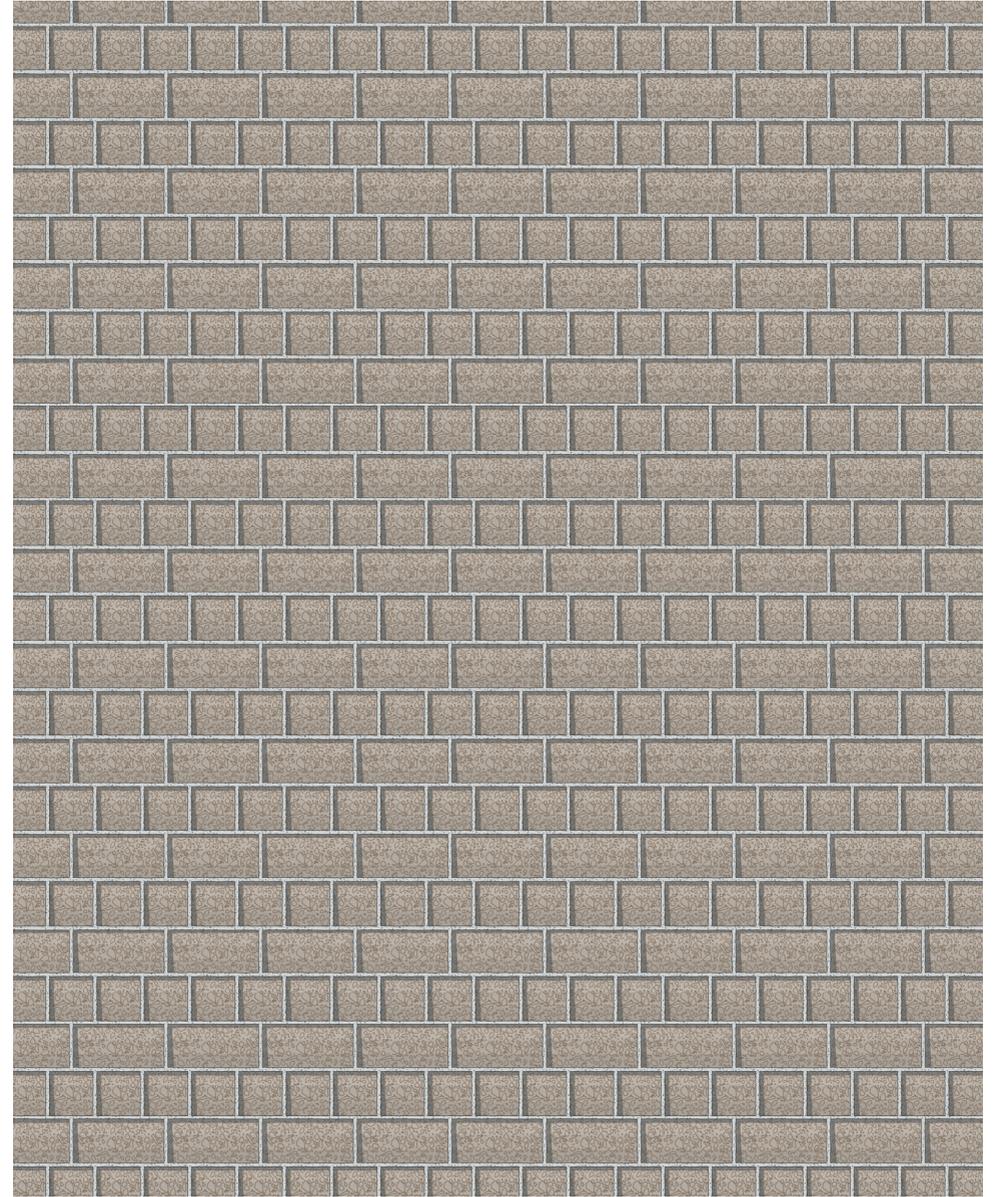


Abb. 5-84: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

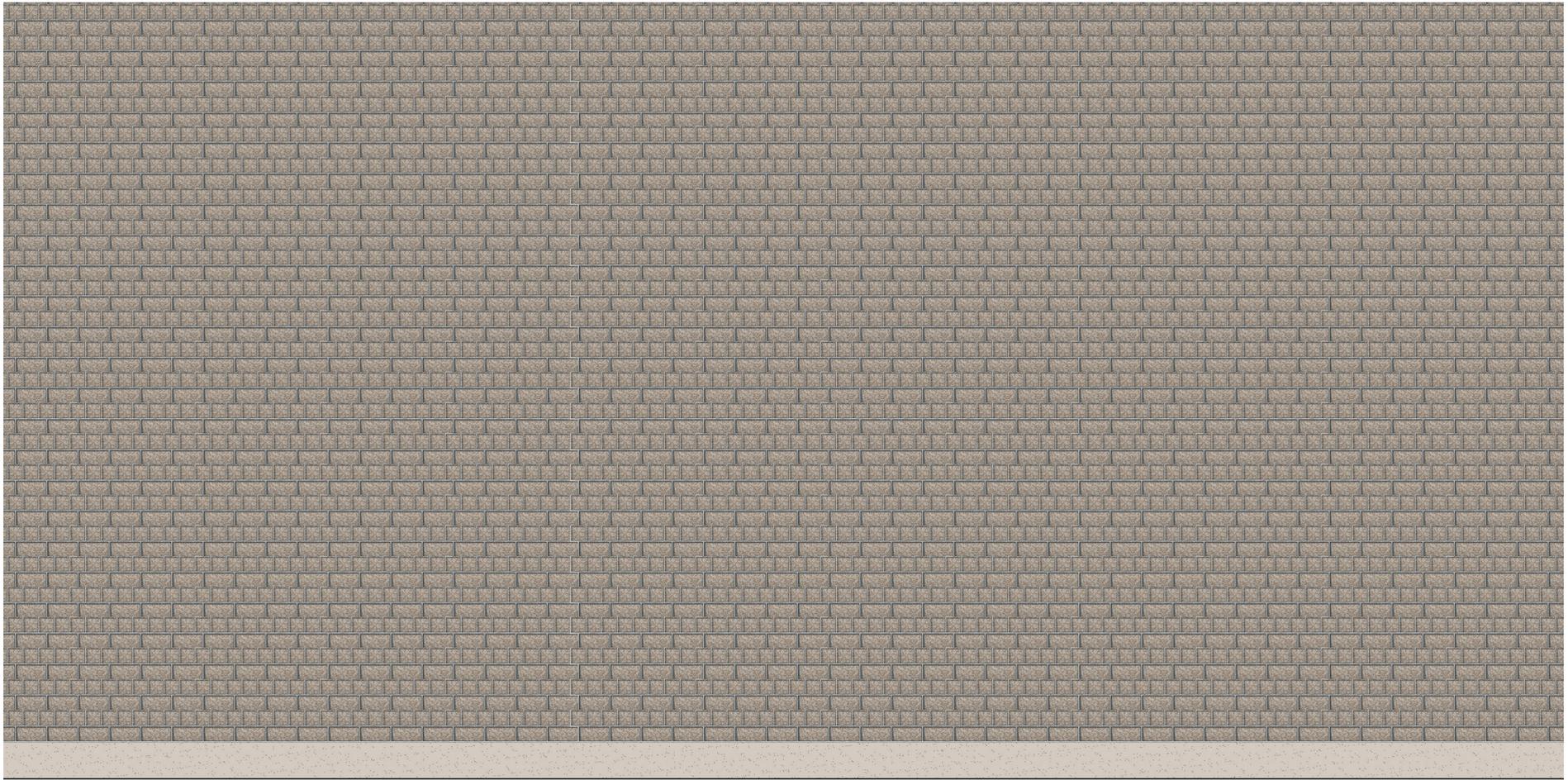
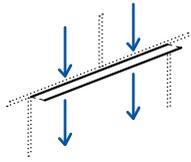
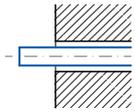


Abb. 5-85: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.9 Bg-Vf



Abbremsen
gleichförmig



Vorgefertigte Leiste
in Fuge



Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung
(Vgl. S. 164)

Konstruktive Detaillierung
Vgl. S. 171 bzw. Abb. 5-36

Gestalt

Durch den Überstand der horizontalen Leisten, sowie die geringere Breite der Stoßfugen, ergibt sich zunächst eine deutlich horizontale Wirkung der Wand. Mit fortschreitender Erosion treten die gegeneinander versetzten Stoßfugen immer stärker hervor und rhythmisieren die Oberfläche dezent.

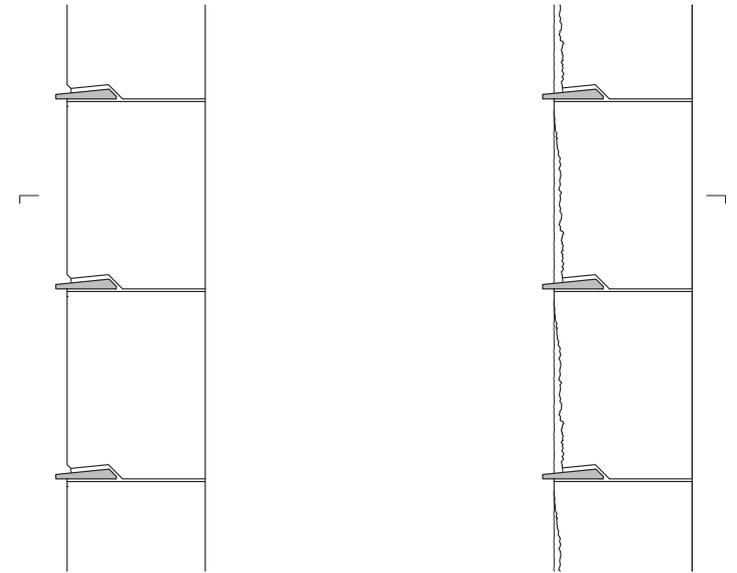


Abb. 5-86: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

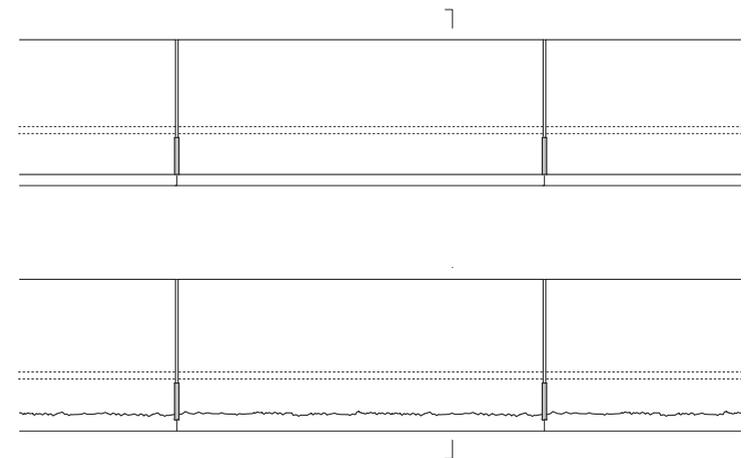


Abb. 5-87: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

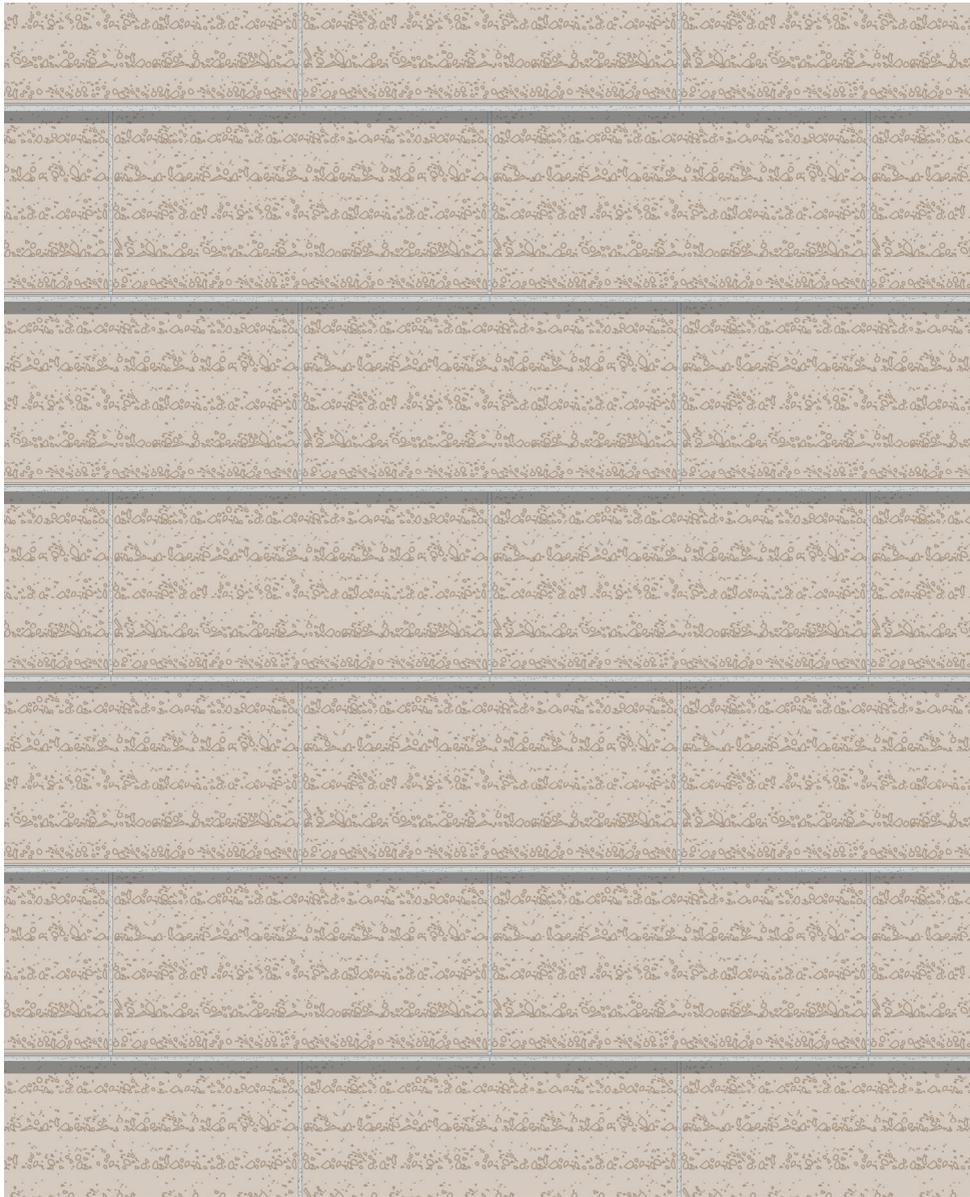


Abb. 5-88: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

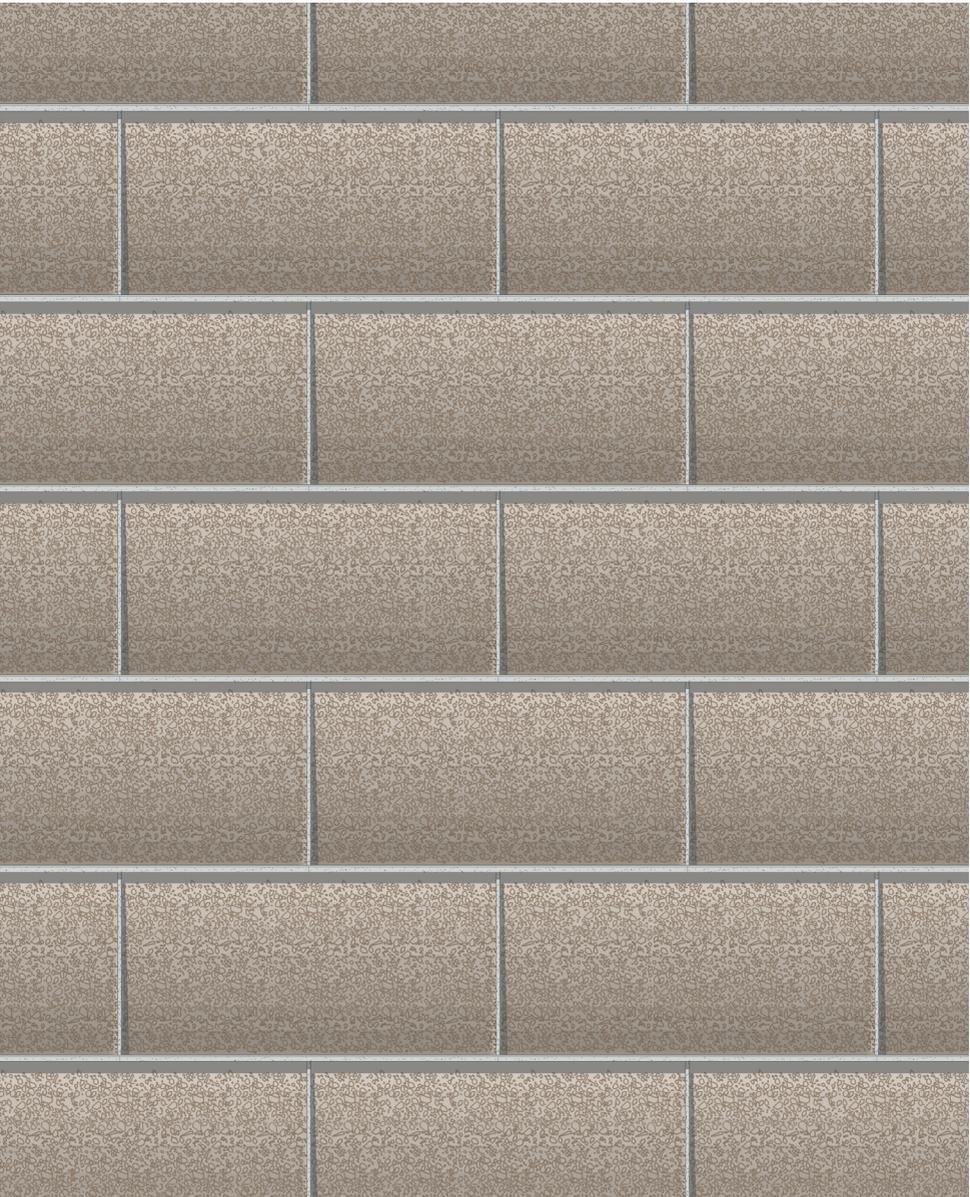


Abb. 5-89: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

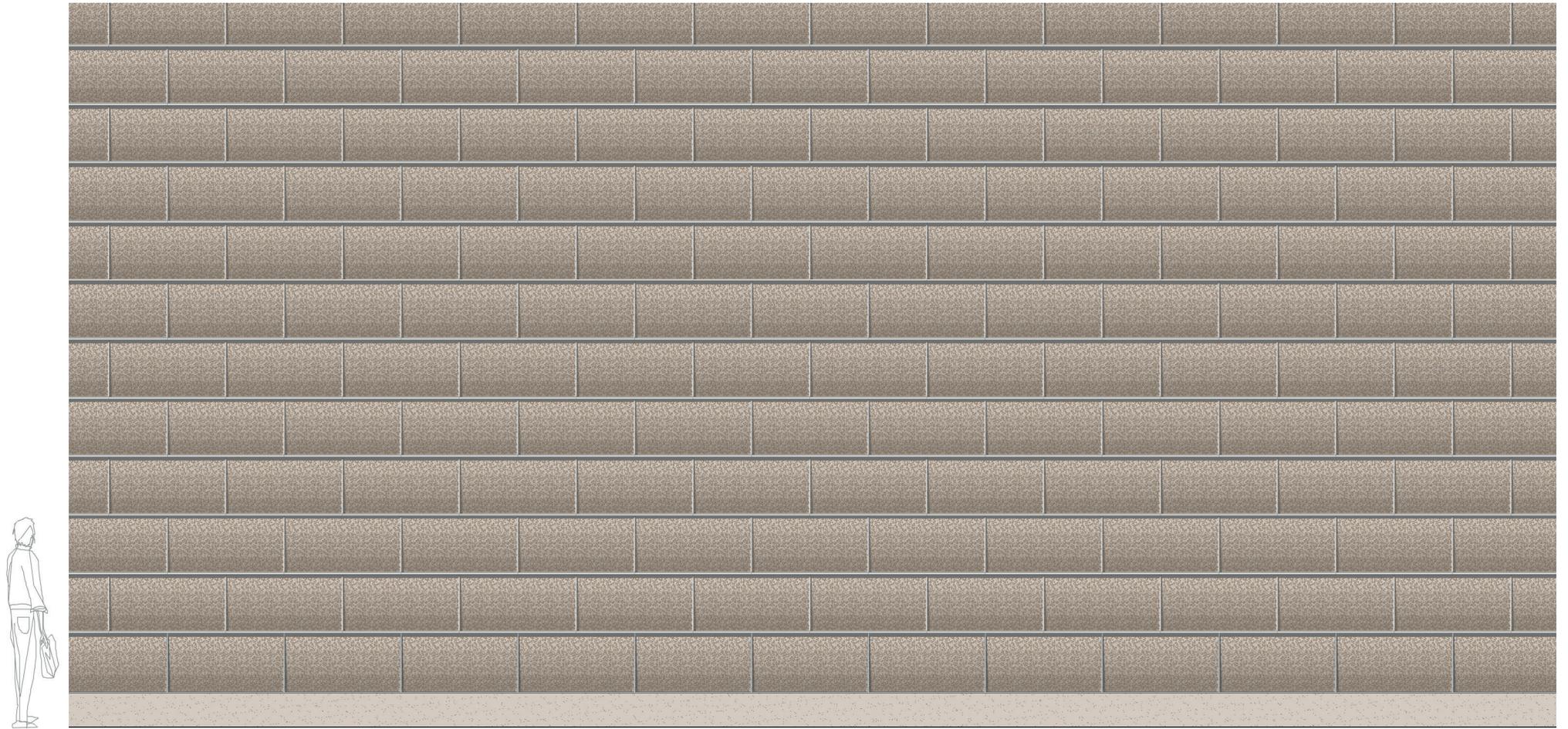
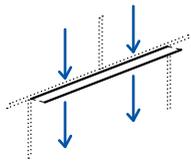


Abb. 5-90: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.10 Bg-Vv



Abbremsen
gleichförmig



Vorgefertigte Leiste
Verbund mit Lehmstein

50

Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung
(Vgl. S. 164)

Konstruktive Detaillierung
Vgl. S. 172 bzw. Abb. 5-37

Gestalt

Das Erscheinungsbild der Wandoberfläche ähnelt zu großen Teilen dem in Studie Bg-Vf, wobei die größere Leistenstärke bzw. -ansichtsbreite der Leiste eine etwas kräftigere horizontale Linie erzeugt.

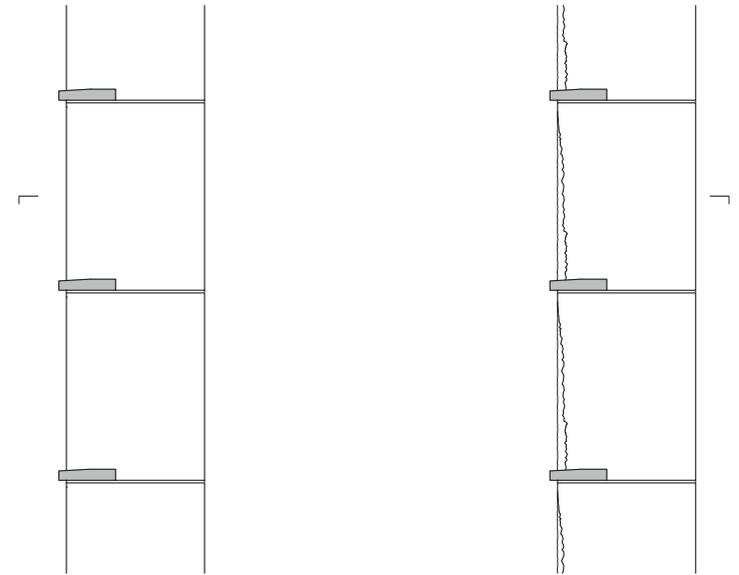


Abb. 5-91: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

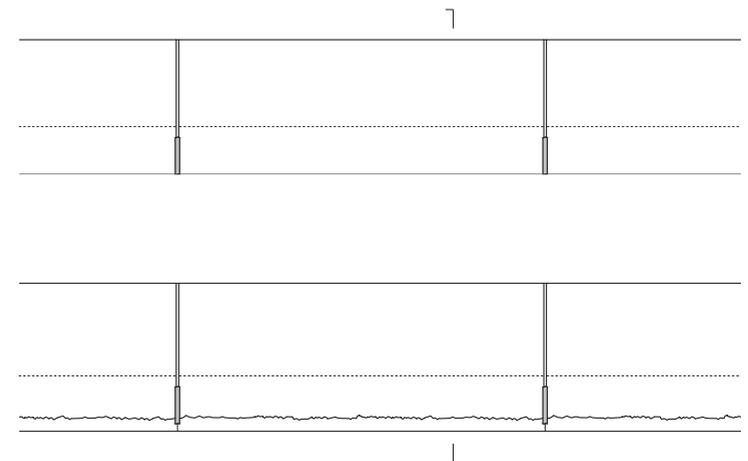


Abb. 5-92: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

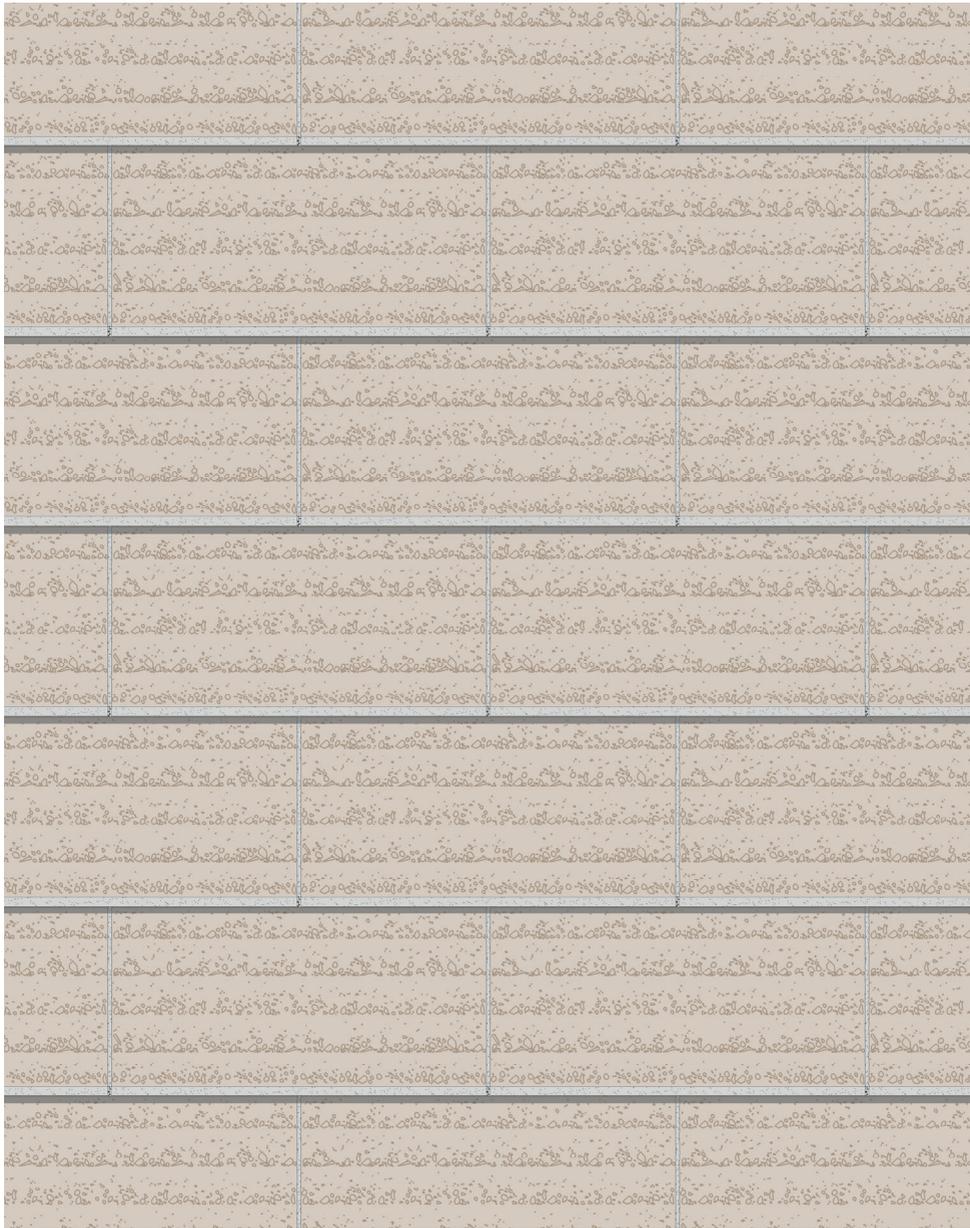


Abb. 5-93: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

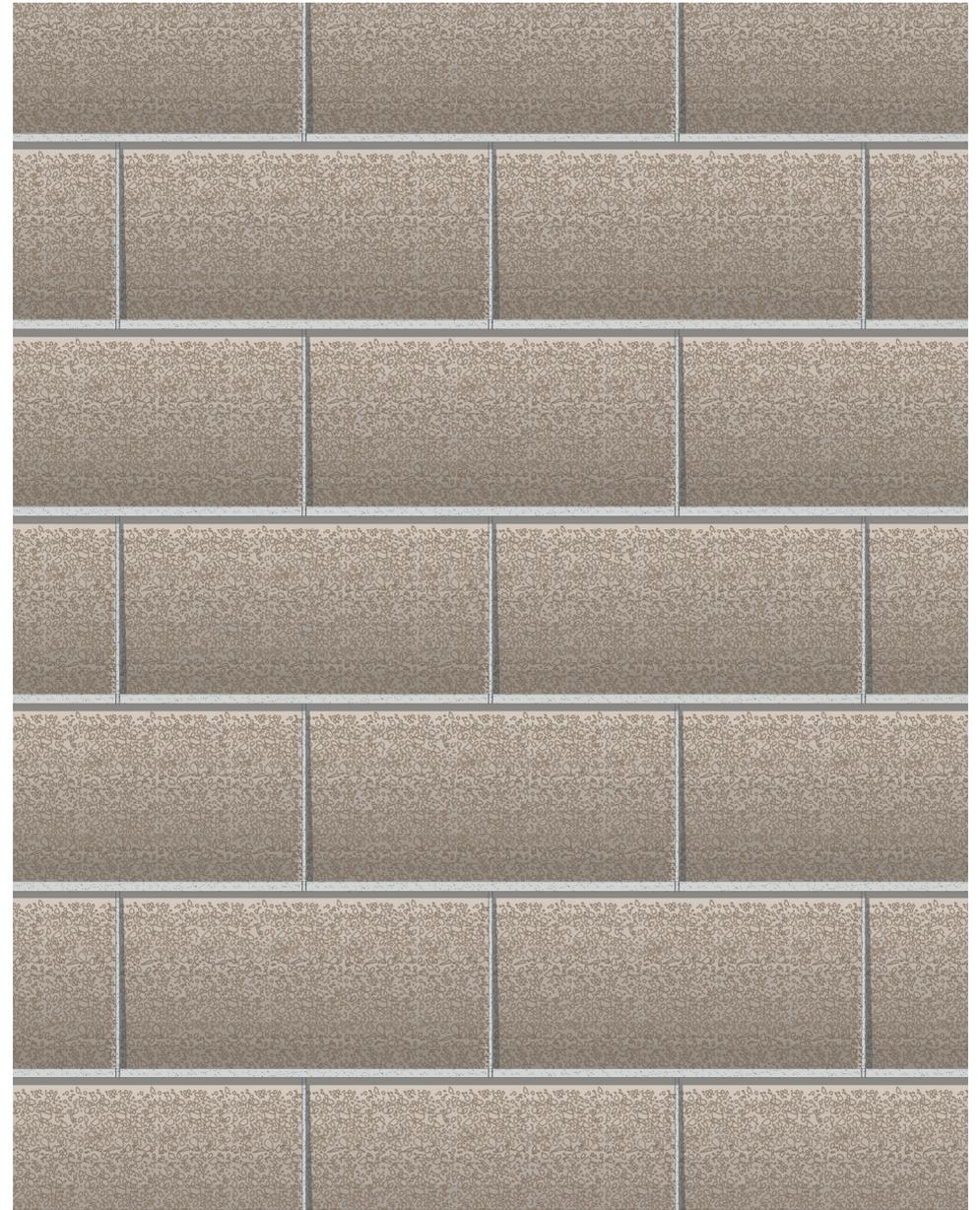


Abb. 5-94: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

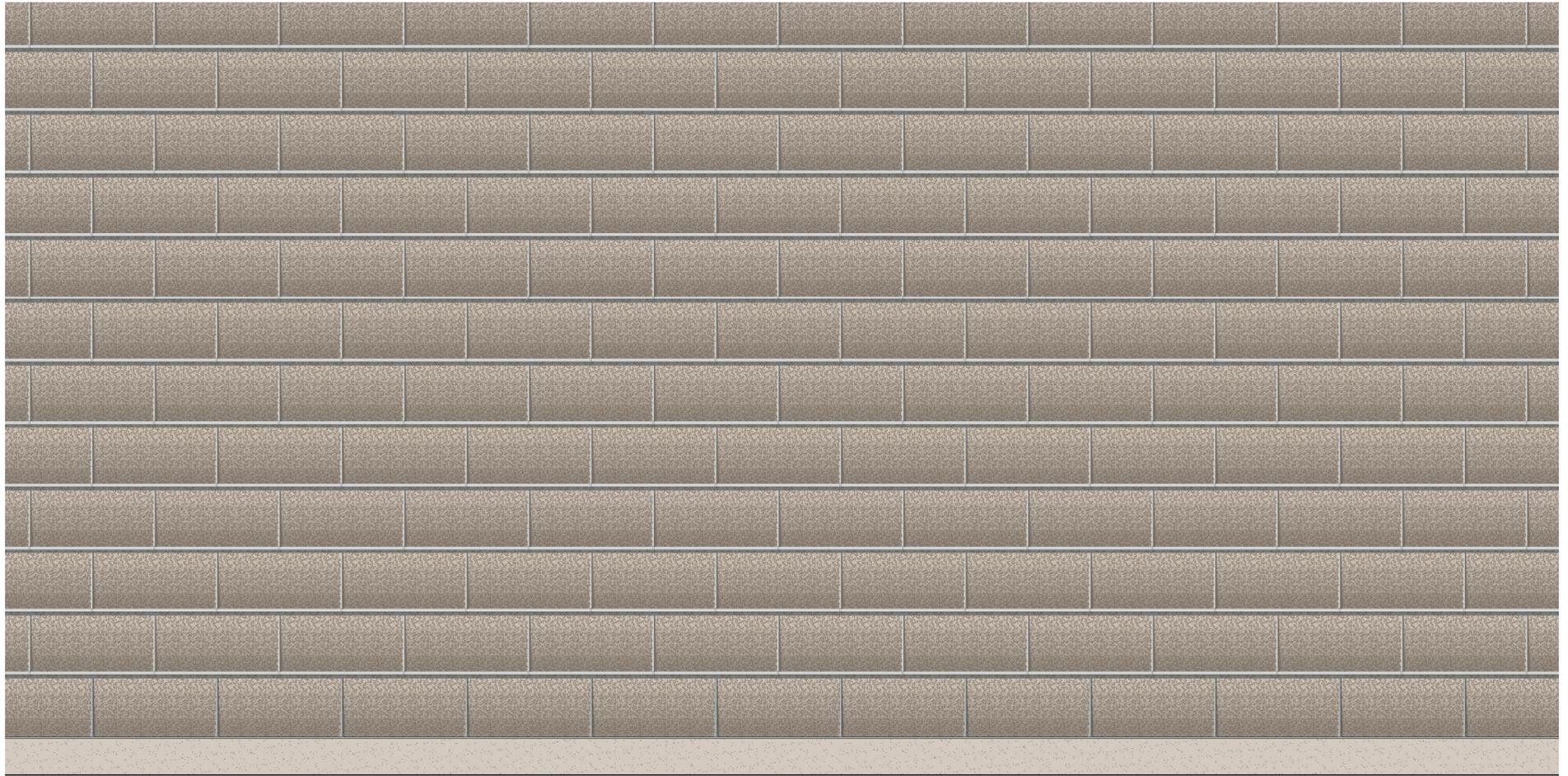
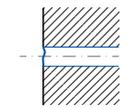
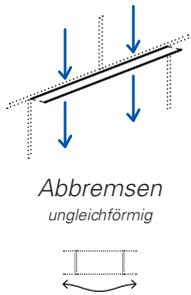


Abb. 5-95: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.11 Bu-M



Mörtelleiste

50

Schichthöhe 50 cm

Entwurfliche Umsetzung

Auch bei diesem Beispiel handelt es sich um eine direkte Abwandlung von Studie Bg-M (→ S. 224). Dabei wird die Ungleichförmigkeit der Wirkungsweise durch eine einfache Modifikation der Leisten hergestellt. Diese treten wellenlinienförmig von der Oberfläche zurück, wodurch der Grad ihrer Schutzwirkung variiert und die Steinkanten freigelegt werden. Je stärker die Erosionsleiste am betreffenden Punkt zurücktritt, desto geringer ist hier die stabilisierende Wirkung der Leiste auf die Steinkanten, als auch ihre bremsende Wirkung auf den Wasserablauf.

Um an die horizontalen Leisten anzuschließen, treten auch die vertikalen Leisten jeweils nach oben hin zurück. Auch diese sind hier 2 cm stark ausgeführt, um die Stabilität zu erhöhen.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 168 bzw. Abb. 5-32. Die Modifikation der Leisten erfolgt durch Nachformung von außen. Hierzu werden nach dem Vermauern der Lehmsteine Formteile in den noch plastischen Lager- und Stoßfugen-Mörtel eingedrückt.

Gestalt

Bezüglich des Maßes des Materialabtrags ist anzunehmen, dass sich dieses in etwa an das Maß des Zurücktretens der Leiste im betreffenden Bereich angleicht, die Erosionsleiste die formale Wandlung der Oberfläche also grob vorbestimmt.

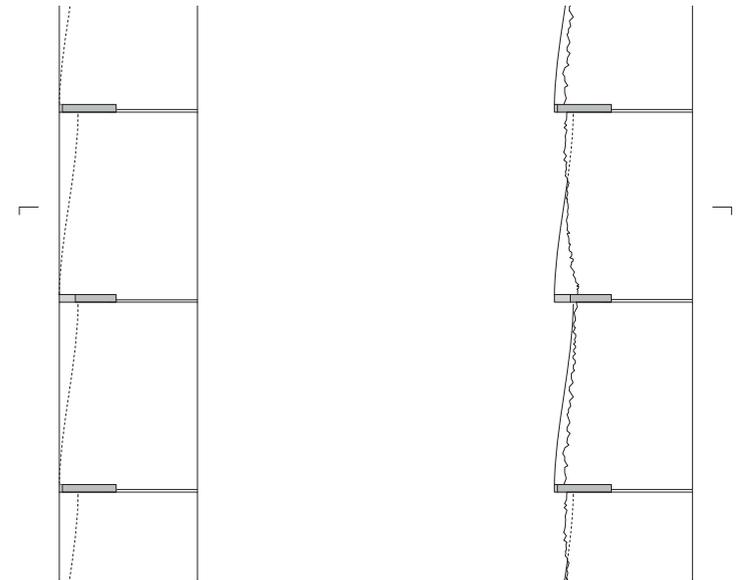


Abb. 5-96: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

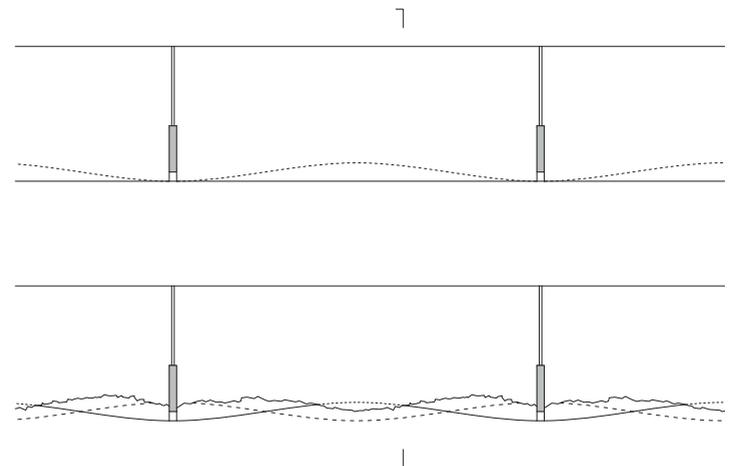


Abb. 5-97: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)



Abb. 5-98: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

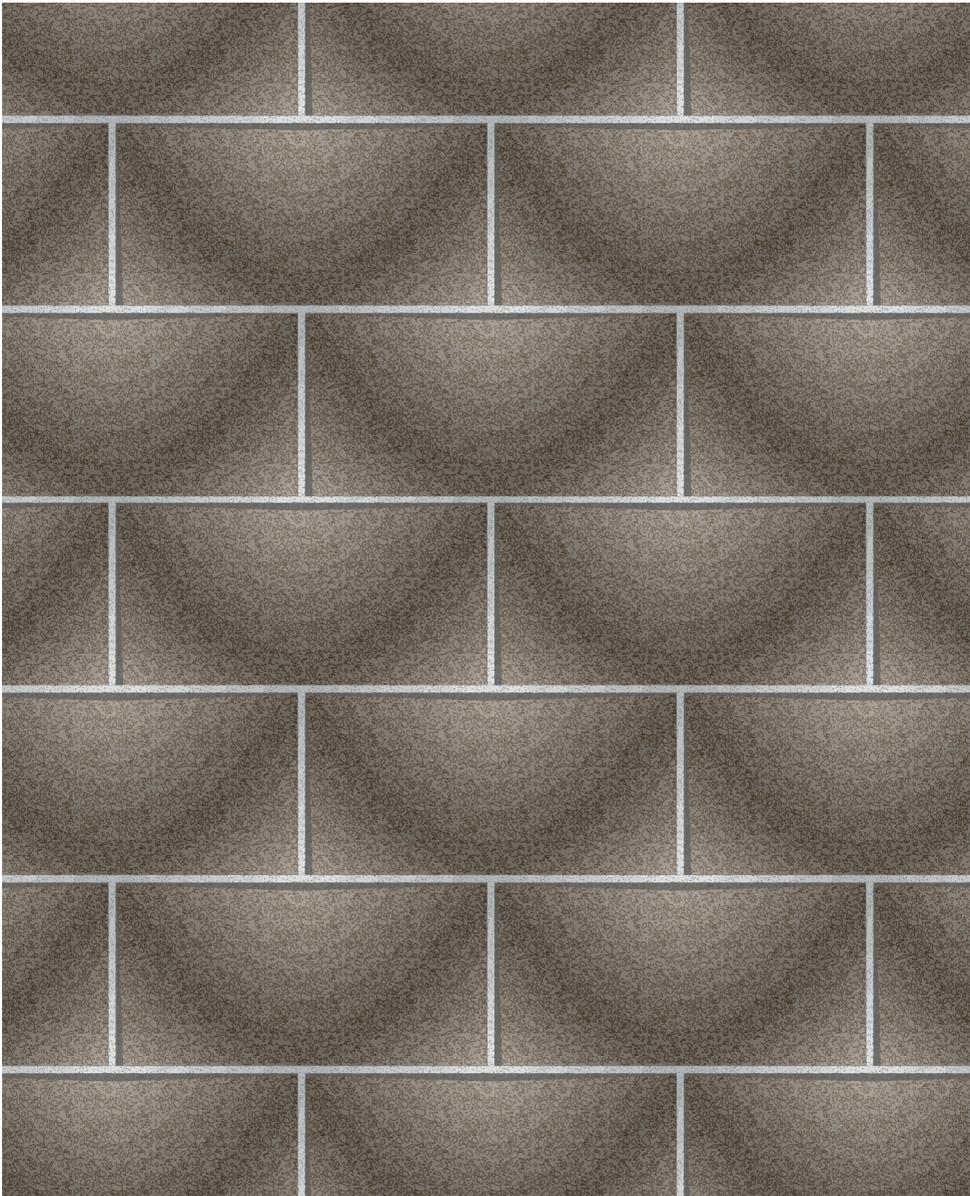


Abb. 5-99: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

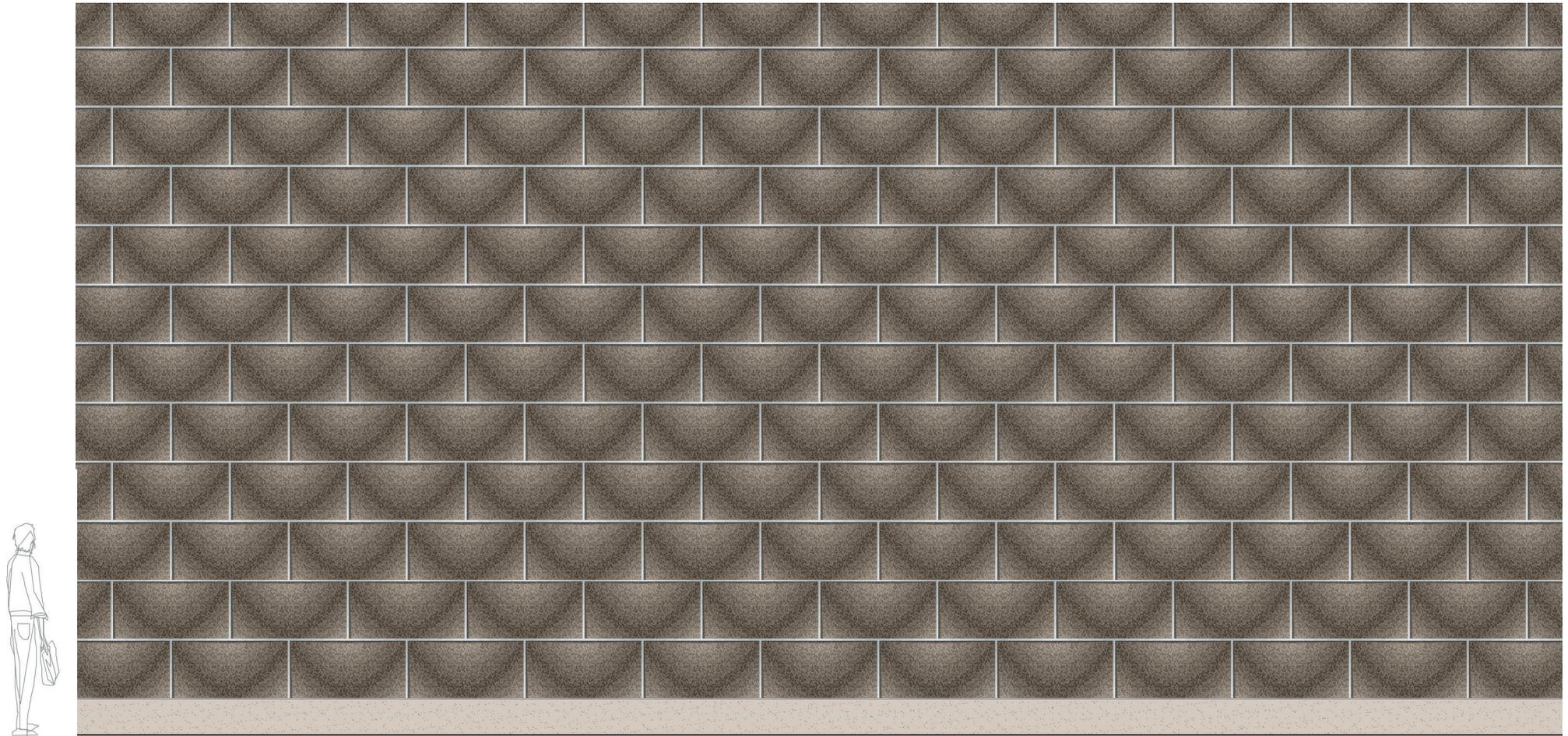
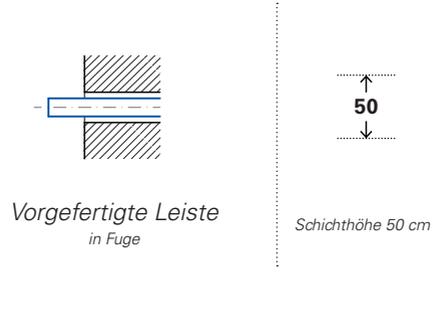
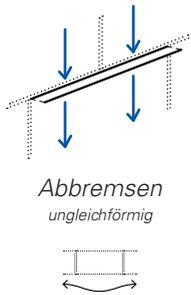


Abb. 5-100: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.12 Bu-Vf



Entwurfliche Umsetzung

Ähnlich wie bei Studie Bu-M (→ S. 248) wird die Ungleichförmigkeit der Wirkungsweise hier durch einen wellenlinienförmigen Verlauf der Leistenvorderkante umgesetzt. Der Leistenüberstand beträgt zwischen 0 und 3 cm, wobei die maximale Auskrägung über den Stoßfugen der darunterliegenden Steinlage erreicht wird.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. S. 171 bzw. Abb. 5-36

Gestalt

Hinsichtlich der direkten Gestaltprägung ergibt sich ein im Vergleich mit Studie Bg-Vf ähnliches Fassadenbild. Dieses wird jedoch durch den ungleichförmigen Verlauf der Leistenvorderkante – vor allem bei starkem Schattenwurf – zusätzlich belebt.

Hierzu trägt auch die ungleichmäßige Erosionsbeanspruchung der Oberfläche bei. Im Bereich unterhalb des zurücktretenden Teils der Leiste ist von einer stärkeren Erosion als unterhalb des vorkragenden Teils auszugehen.

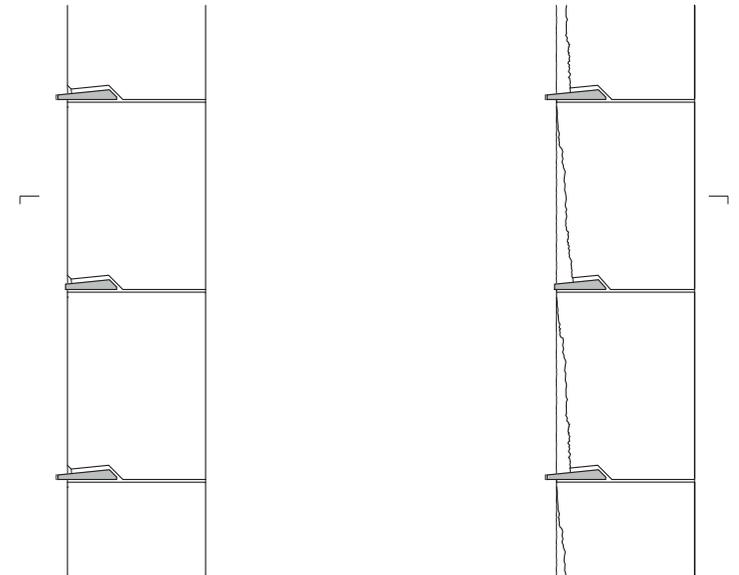


Abb. 5-101: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

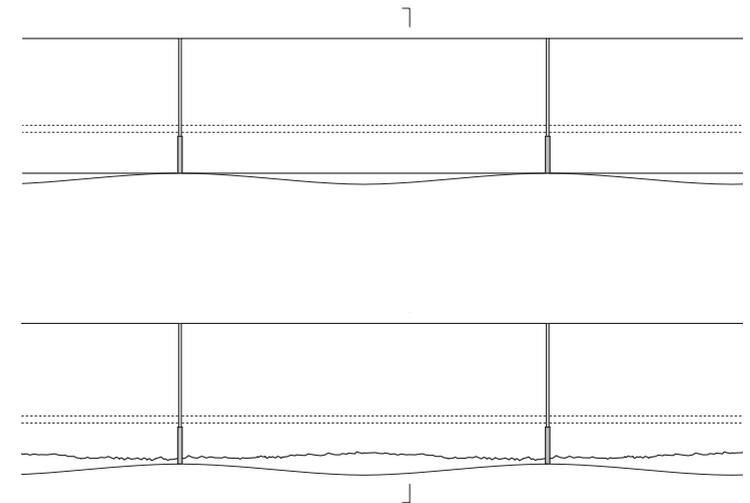


Abb. 5-102: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

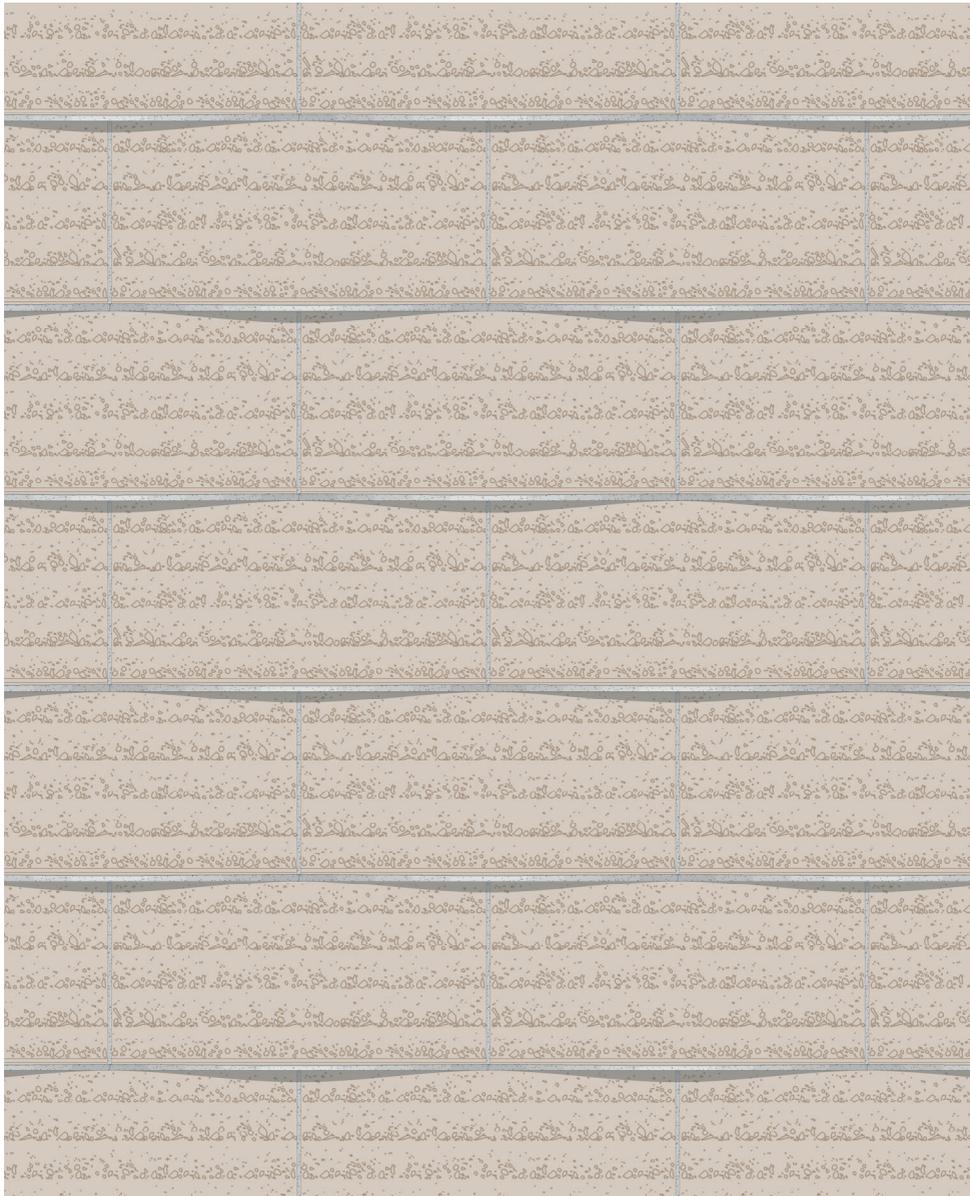


Abb. 5-103: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

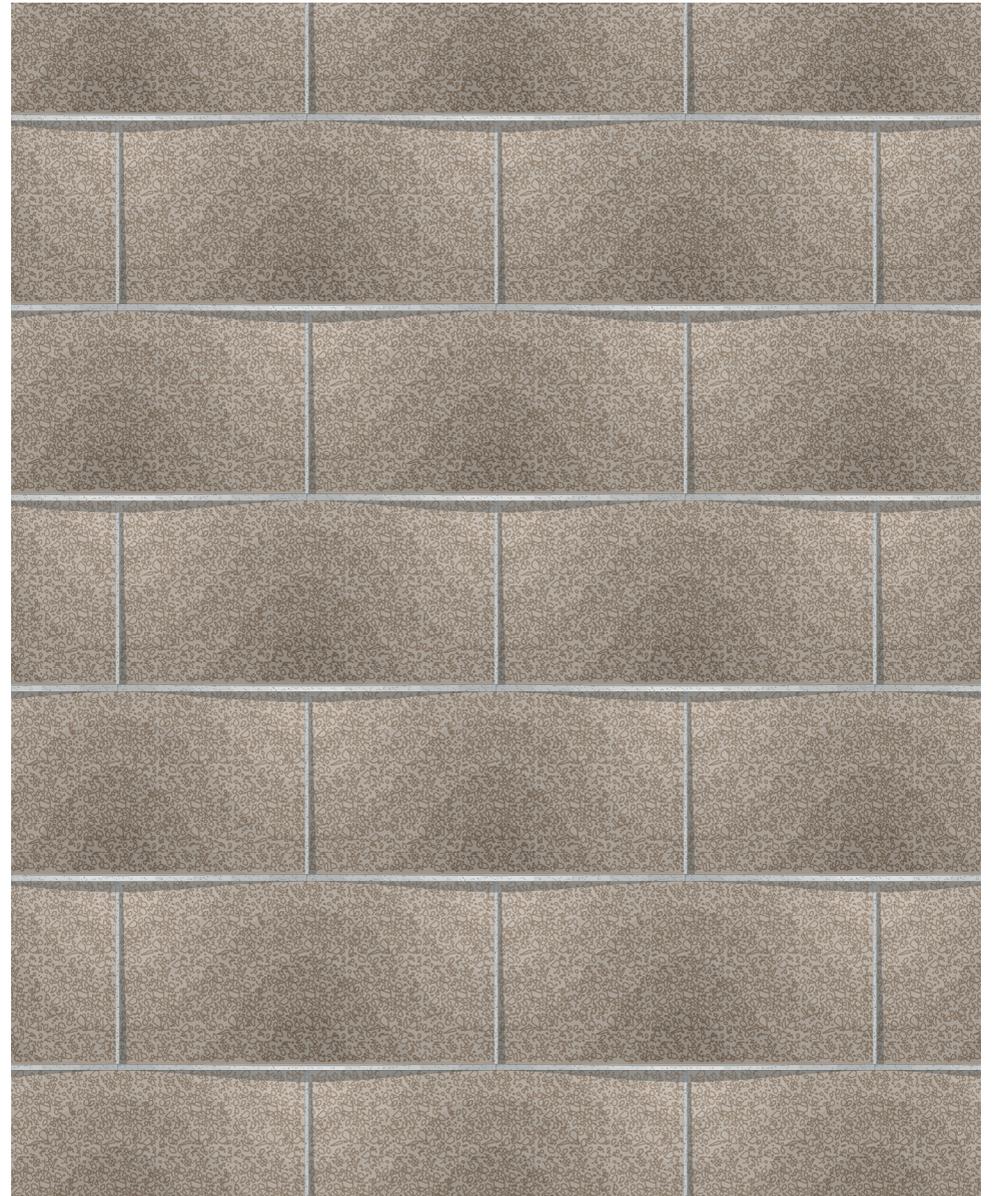


Abb. 5-104: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

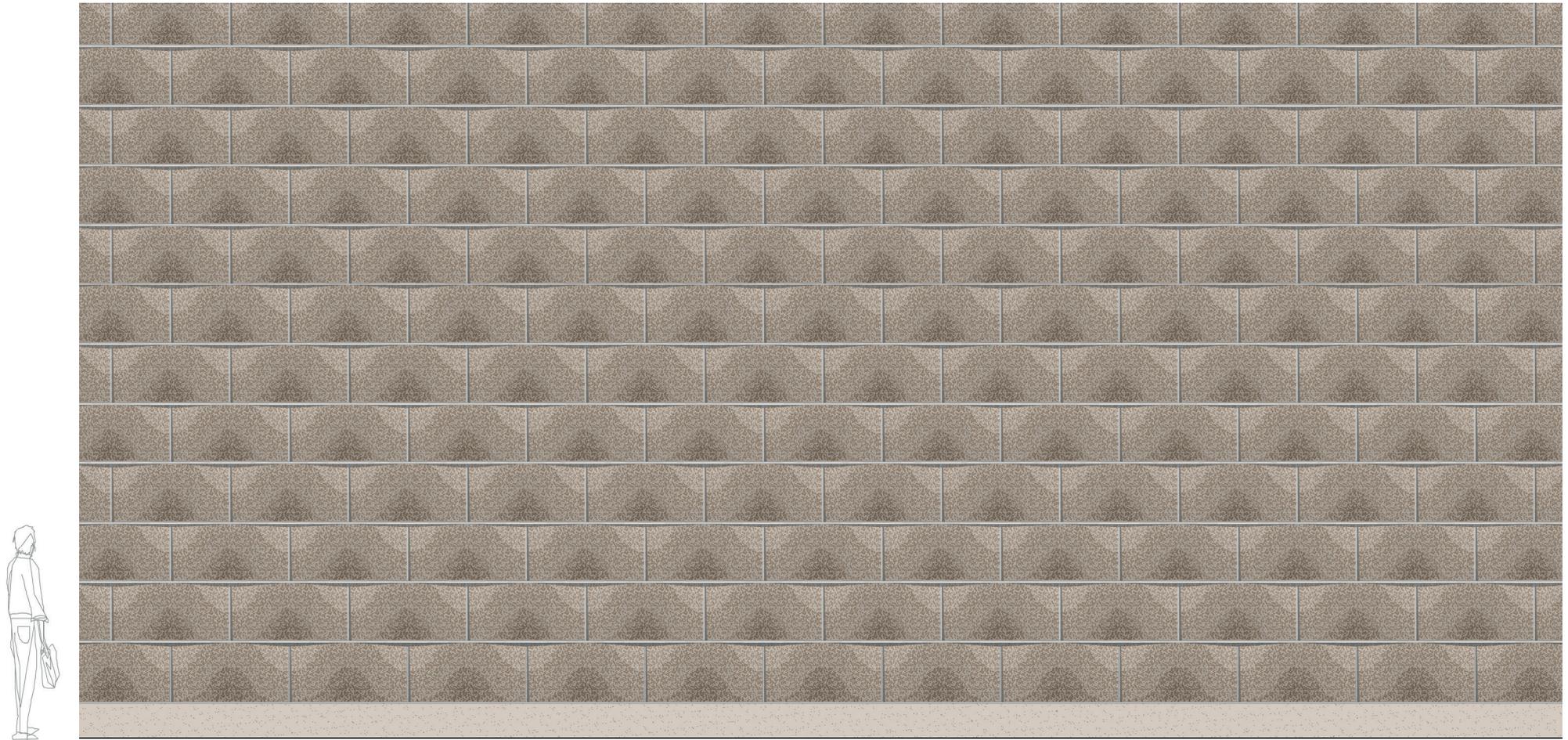
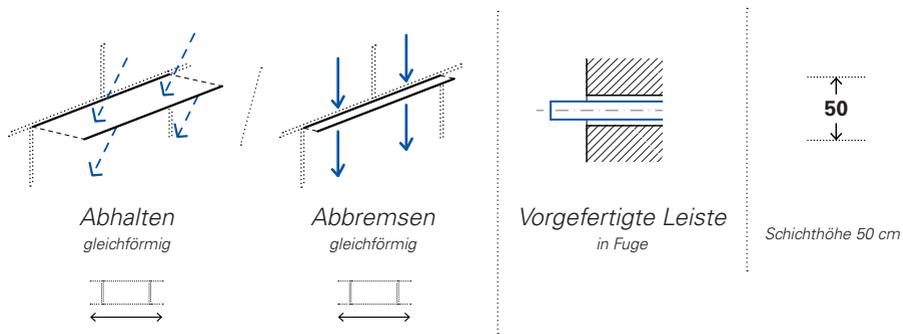


Abb. 5-105: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.3.5.13 Hg/Bg-Vf



Entwurfliche Umsetzung

Dieses letzte Beispiel zeigt einen Spezialfall der Anwendung von Erosionsleisten, und daher eine größere entwurfliche Freiheit. Allein aus Gründen der plastischen Gestaltung werden hier innerhalb des Wandbauteils unterschiedlich tiefe Lehmsteine verwendet, sodass die Wandoberfläche von Stein zu Stein verspringt. Die Vorderkanten der Erosionsleisten liegen jedoch auf gleicher Linien, wodurch sich unterschiedliche Überstände über die Lehmoberfläche ergeben. Während Regenwasser von den zurücktretenden Steinoberflächen stärker abgehalten wird, wirken die gleichen Leisten auf den vorkragenden Steinen stärker abbremsend. Es liegt somit eine hybride Wirkungsweise vor.

In Ergänzung der horizontalen Leisten kommen hier vorgefertigte, vertikale Erosionsleisten zum Einsatz.

Konstruktive Detaillierung

Vgl. Studien Hg-Vf, S. 188, sowie Bg-Vf, S. 236. Bei den vertikalen Leisten ist ein seitlicher Umgriff gewählt, um die vorkragenden, vertikalen Steinkanten zusätzlich zu schützen.

Gestalt

Aufgrund der großen Ansichtsbreite der vertikalen Leisten entsteht hier eine deutliche Brechung der dominierenden Horizontalen. Zusätzlich verstärkt wird diese durch das Vor- und Zurückspringen der Steinoberflächen, sowie die zu erwartende, ungleichmäßig starke Erosion auf den Steinoberflächen.

Insgesamt ergibt sich eine sehr plastische, gleichermaßen horizontal und vertikal strukturierte Fassadengestalt.

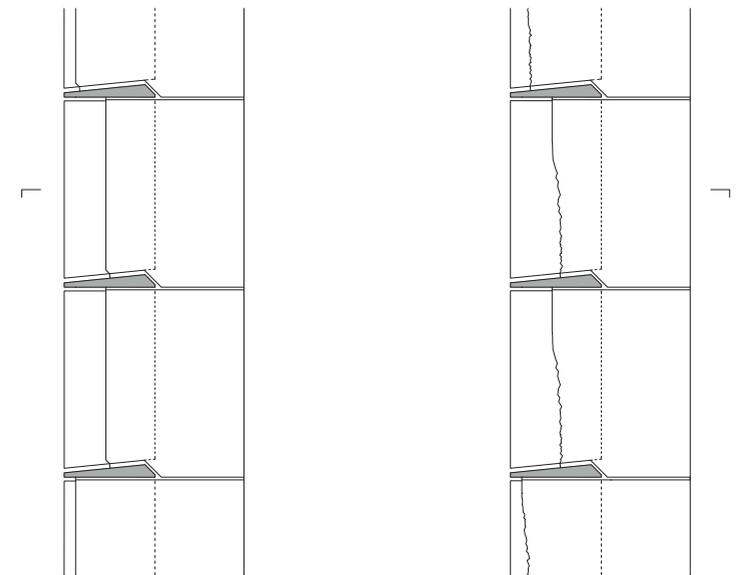


Abb. 5-106: Vertikalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

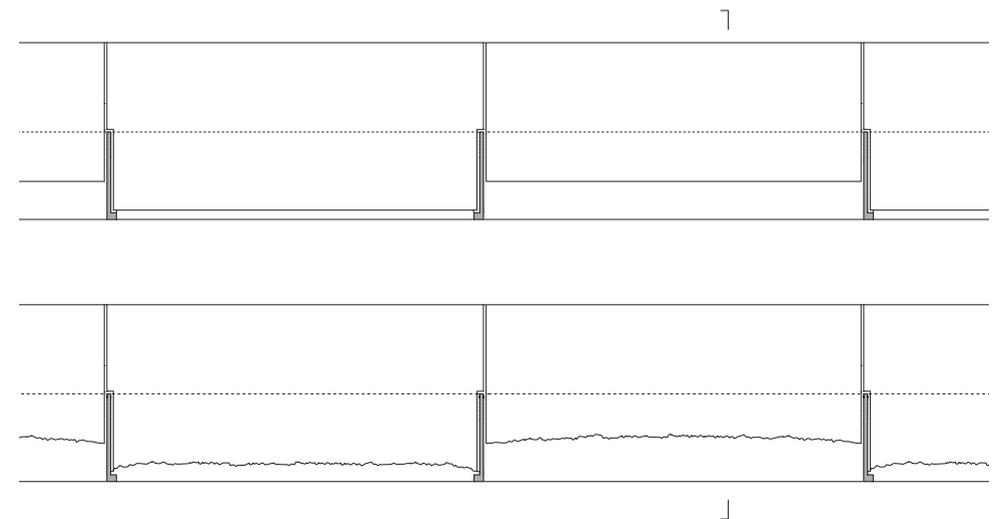


Abb. 5-107: Horizontalschnitte (Ausschnitt) Zustände 1+2 (M. 1:20)

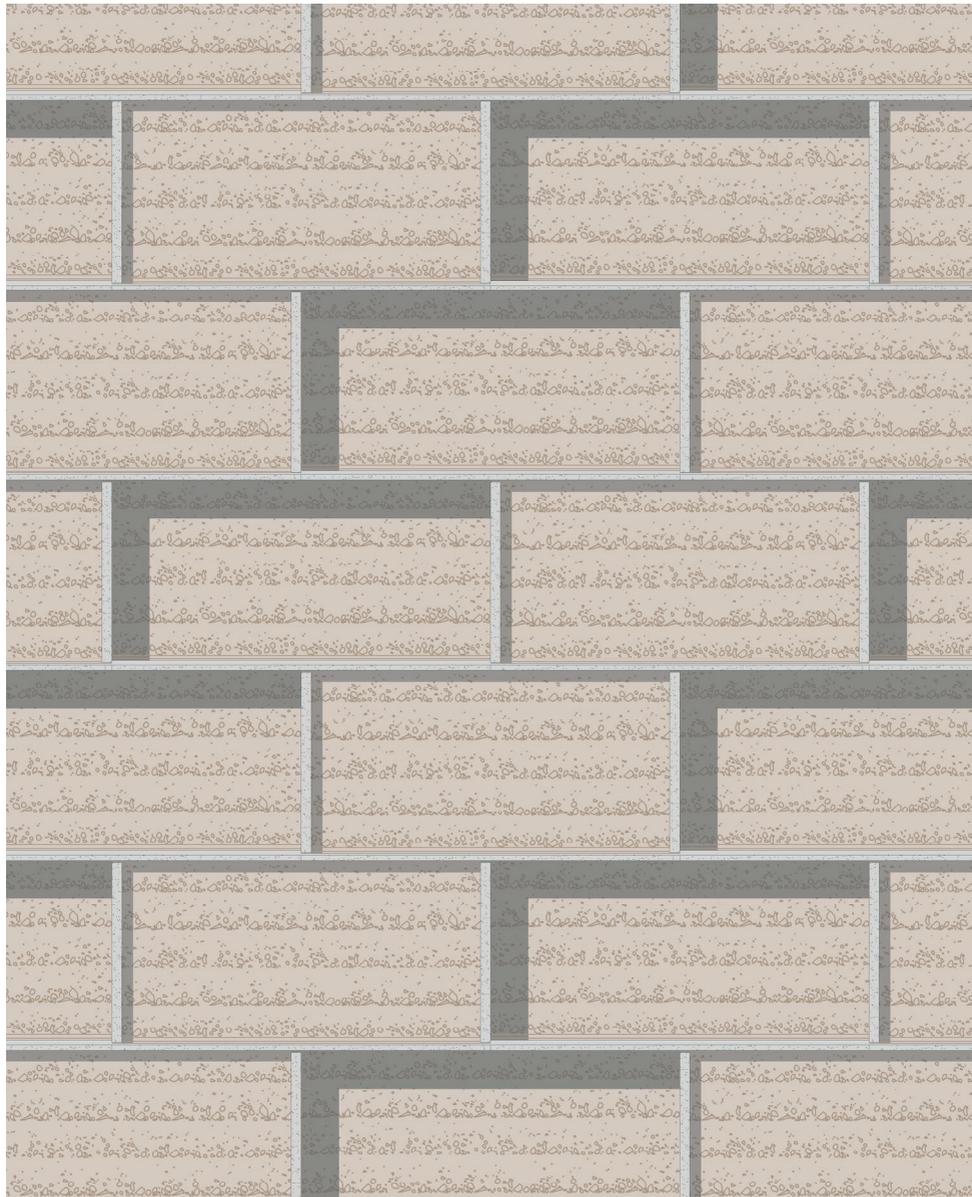


Abb. 5-108: Ansicht Zustand 1 (M. 1:20)

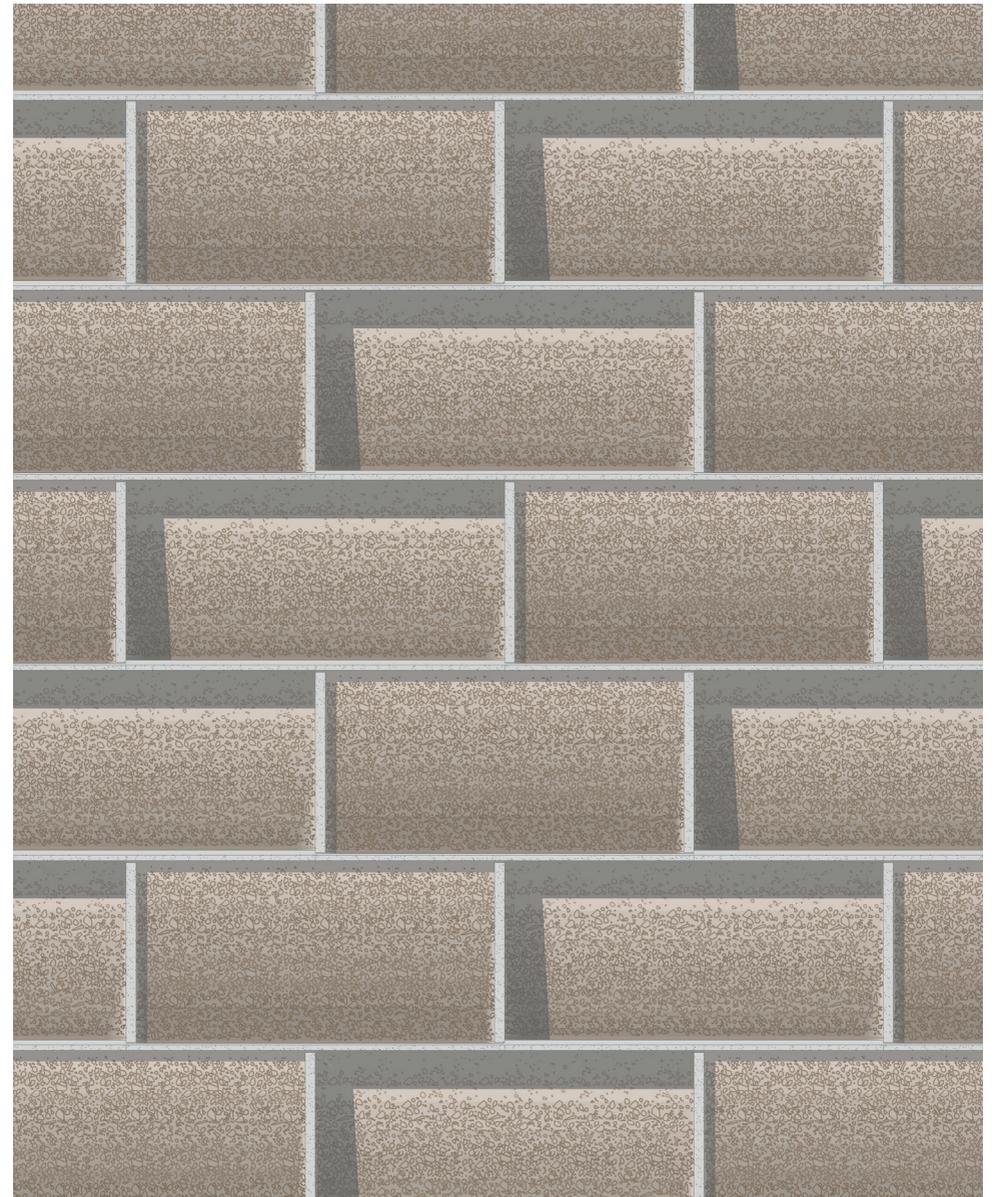


Abb. 5-109: Ansicht Zustand 2 (M. 1:20)

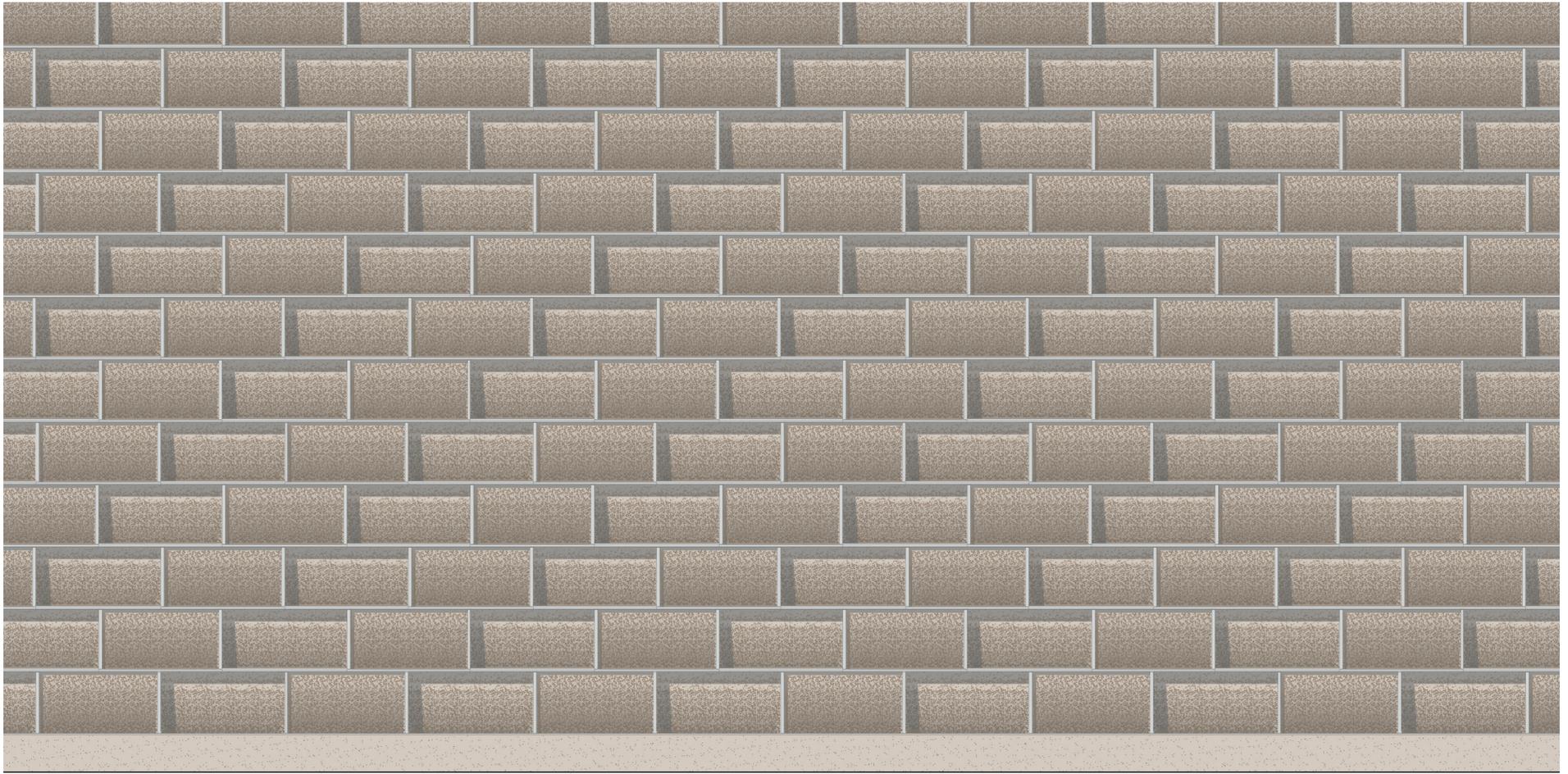


Abb. 5-110: Ansicht Zustand 2 (M. 1:50)

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel wurde die Erosionsleiste als Mittel der Umsetzung kalkulierter Erosion in Stampflehm-Mauerwerk untersucht. Auf eine Definition grundlegender Anforderungen an deren Gebrauch folgend, wurde eine typologische Ordnung etabliert, und die einzelnen Typen in parallel geführten Anwendungsstudien auf ihre funktionale und gestalterische Eignung hin erprobt.

Insgesamt zeigt sich, dass Erosionsleisten einen wichtigen Beitrag zum Schutz des Wandbauteils vor Erosion, als auch als Gestaltungselemente leisten können. Die eingangs definierten Anforderungen an den Gebrauch aufnehmend, sollen die Ergebnisse im Folgenden näher besprochen werden, und dabei eine vergleichende Betrachtung der Typen stattfinden.

5.4.1 Schutz der Oberfläche

Wie durch die Anwendungsstudien illustriert, ist mithilfe der untersuchten Typen eine große Bandbreite von Schutzgraden umsetzbar. Abb. 5-111 zeigt die Typen in einer groben Einordnung auf einem Spektrum zwischen minimal und maximal möglicher Schutzwirkung.³³ Das obere Ende bildet hier Typ Hg-Vf (→ Studie S. 188). Mit diesem ist ein sehr hoher Schutz erzielbar, welcher auch an stark windbeanspruchten Standorten oder hohen Fassaden ausreichend ist. Eine etwas geringere Schutzwirkung bietet Typ Hu-Vf (→ S. 200), wobei es hier auf die konkrete Ausgestaltung der Leiste ankommt. Auch die Typen Lf-Vf (→ S. 206) und Ls-Vf (→ S. 218) sind im Bereich der stärkeren Schutzwirkung einzuordnen, weisen jedoch einen im Vergleich mit Hg-Vf und Hu-Vf deutlich geringeren Schutz auf. Einen Schritt weiter unten sind die Typen Bg-Vf/Bg-Vv (→ S. 236, S. 242) sowie Lr-Vf (→ S. 218) anzusiedeln. Die Typen Bg-M (→ S. 224) sowie Bu-Vf (→ S. 254) wiederum sind eher im unteren Bereich der Schutzwirkung zu verorten. Sie sind insofern grob vergleichbar, als bei Typ Bu-Vf die geringere Schutzwirkung der ungleichförmigen Wirkungsweise durch das höhere Schutzpotential der vorgefertigten Leiste in etwa aufgewogen wird. Typ Bu-M (→ S. 248) schließlich bietet den mit Abstand geringfügigsten Schutz der Oberfläche.

³³ Die Einordnung basiert auf den in den Studien vorgenommenen Abschätzungen hinsichtlich des Einflusses der Leistentypen auf den Erosionsprozess.

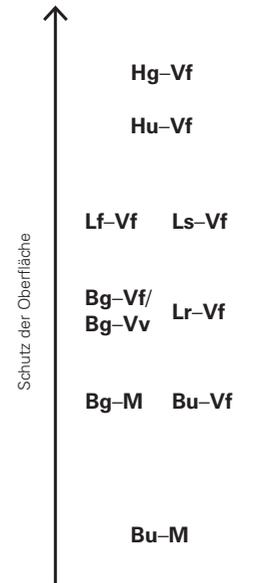


Abb. 5-111:
Einordnung der Typen
hinsichtlich ihrer Schutzwirkung

5.4.2 Schutz der Fugen und Steinkanten

Was den Schutz der Mauerwerksfugen angeht, so sind die Anwendungsstudien nur in geringem Maße zur Bewertung geeignet. Wie in Abschnitt 5.3.2 („Herstellungstechnische Ansätze“) ersichtlich wird, kann der Fugenschutz jedoch im Prinzip von allen hier behandelten Leistentypen als gewährleistet angesehen werden.

Das Schutzpotential der Leisten ergibt sich vor allem aus ihrer Lage an bzw. in den Mauerwerksfugen. Dabei ist von Unterschieden im Grad der Schutzwirkung aufgrund unterschiedlicher Herstellungsweisen auszugehen. So kann etwa durch vorgefertigte Leisten und den hier möglichen Überstand ein höherer Schutz der horizontalen Fugen erreicht werden als durch Mörtelleisten.

Darüber hinaus kann auch die Wirkungsweise einen Beitrag zum Schutz der Fugen leisten. Etwa ist durch das Abhalten des Wassers mittels horizontaler Leisten zugleich ein Schutz der vertikalen

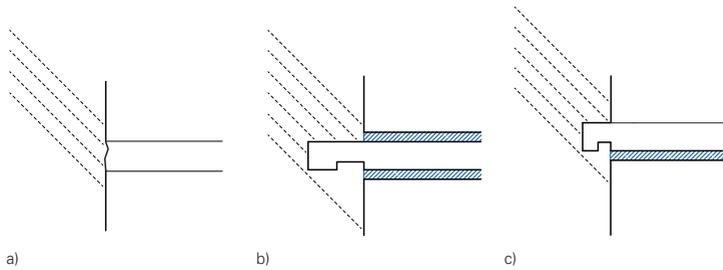


Abb. 5-112: Unterschiedliche Grade des Schutzes der Fugen und Steinkanten, abhängig von der Herstellungsweise der Erosionsleiste (Schemazeichnungen):
 a) Mörtelleiste (M) – hier wird die Lehmfuge komplett eliminiert, die Steinkanten allerdings nur bedingt geschützt;
 b) vorgefertigte Leiste in der Fuge (Vf) – während die obere Fuge und Steinkante grundsätzlich ungeschützt verbleiben, werden die unterhalb der Leiste befindliche Fuge und Steinkante durch den relativ großen Leistenüberstand sehr gut geschützt;
 c) vorgefertigte Leiste im Verbund mit dem Lehmstein (Vv) – hier wird sowohl die Lehmfuge oberhalb der Leiste eliminiert (vgl. Mörtelleiste), als auch die untere Fuge und Steinkante geschützt. Aufgrund des geringeren möglichen Leistenüberstandes fällt der Grad des Schutzes im Vergleich mit b) jedoch geringer aus.

Fugen erreichbar (vgl. Typ Hg–Vf). Besonders bei kleinen Steinformaten (Schichthöhen 25 und vor allem 12,5 cm), und einem damit einhergehenden, hohen Fugenanteil, kann auf diese Weise ein effizienter Schutz der Stoßfugen umgesetzt werden.

Auch bezüglich des Schutzes der Steinkanten werden in Abschnitt 5.3.2 (vgl. S. 179) Einschätzungen vorgenommen. Horizontale Steinkanten können durch vorgefertigte Erosionsleisten wirkungsvoll geschützt werden, wobei nur durch Vorab-Fügung der Leiste (Herstellungsweise Vv) sowohl die oberen, als auch unteren Kanten schützbar sind. Vertikale Steinkanten, falls nicht durch größere Auskragungen horizontaler Leisten (wie bei den Typen Hg–Vf/Hu–Vf) überdeckt, lassen sind nur durch Verwendung vorgefertigter Leisten in den Stoßfugen, welche einen seitlichen Umgriff aufweisen (vgl. Abb. 5-41, S. 178), schützen.

5.4.3 Direkte Gestaltprägung

Was die Anforderungen an die direkte Gestaltprägung – die Förderung traditioneller Gestaltqualitäten des Stampflehmbaus, als auch die Herausbildung der Mauerwerksbauweise eigener Merk-

male – angeht, können in der Anwendung der besprochenen Typen vielfältige Qualitäten erkannt werden. Dabei wird vor allem die Ablesbarkeit der Mauerwerksbauweise, welche als spezielles Ziel adressiert wurde, durch den Gebrauch von Erosionsleisten gefördert.

Zunächst lässt sich in fast allen Studien eine mehr oder weniger starke Dominanz der horizontalen Linie erkennen. Dies ist vor allem auf funktionale und technische Gründe zurückführbar, da die horizontalen Leisten in der Regel stärker als die vertikalen zu dimensionieren sind, oder auch weiter auskragen. In gestalterischer Hinsicht kann diese Prägung als willkommen angesehen werden, da sie eine Fortschreibung traditioneller Gestaltqualitäten bedeutet.

Jedoch verleihen die vertikal nicht durchlaufenden, zueinander versetzten Erosionsleisten in den Stoßfugen dem überlieferten, von einer horizontalen Schichtung dominierten Bild der Stampflehmwand eine neue Prägung. Was die Ausgestaltung dieser im Verhältnis zu ihren horizontalen Pendanten angeht, werden in den Studien verschiedene Ausdrucksformen aufgezeigt. Die Spanne reicht dabei von einer maximal zurückgenommenen Erscheinung (vgl. z. B. → Studie Hu–Vf, S. 200) bis hin zu einer kräftigen Betonung (→ Studie Lf–Vf, S. 206). Auch in letzterem Beispiel jedoch treten die vertikalen Elemente – durch einen geringeren Überstand und eine filigranere Ansicht – gegenüber den horizontalen zurück.

In der entwerflichen Ausgestaltung der Leistentypen liegen zudem weitere Möglichkeiten der gestalterischen Differenzierung. So lässt sich etwa für vertikale Mörtelleisten ein auf den Farbton des Lehms eingefärbter Kalkmörtel, oder mittels Kalk stabilisierter Lehmörtel verwenden, wodurch ein noch stärkeres, optisches Zurücktreten der Vertikalen hinter den Horizontalen erzeugt werden kann.

Darüber hinaus ergeben sich durch den Einsatz von Erosionsleisten allgemein neue Möglichkeiten der Strukturierung der Fassade. Besonders vorgefertigte Leisten erweitern hier das gestalterische Spektrum, da mithilfe ihrer z. B. größere Überstände und somit Tiefenwirkungen der Fassade möglich sind, als auch grundsätzlich eine größere entwerfliche Freiheit (vgl. z. B. Studie Hg/Bg–Vf, → S. 260) gegeben ist.

In den Studien zu den Mauerwerks-Schichthöhen 25 und 12,5 cm (S. 194, S. 230) zeigt sich zudem exemplarisch der Einfluss des Steinformats auf die Wirkung der Erosionsleisten. Hier bestätigt sich die Vermutung, dass kleinere Elementgrößen tendenziell feiner untergliederte, „flächigere“ Fassadengestalten erzeugen.

5.4.4 Indirekte Gestaltprägung

Auch im Bereich der indirekten Gestaltprägung werden in den Studien verschiedene Qualitäten bzw. Potentiale ersichtlich. Die untersuchten Typen zeigen dabei sehr unterschiedlich gearteten, so wie unterschiedlich starken Einfluss auf die Bauteilgestalt. Die Spanne reicht von einer kaum wahrnehmbaren Erosion (z. B. Typ Hg-Vf, → S. 188) bis hin zu einer merklichen Formung der Oberfläche (z. B. Typ Bu-M, → S. 248). Im Speziellen sind hier die Typen mit ungleichförmiger Wirkungsweise zu nennen. Die durch diese erzeugten Gradienten der Rauheit und Verwitterung machen den Erosionsprozess sichtbar, und steigern die Ausstrahlung der Stampflehmoberfläche in besonderem Maße. Durch die entstehenden Muster auf der Wandoberfläche wird ferner auch die Ablesbarkeit der Mauerwerksbauweise verstärkt.

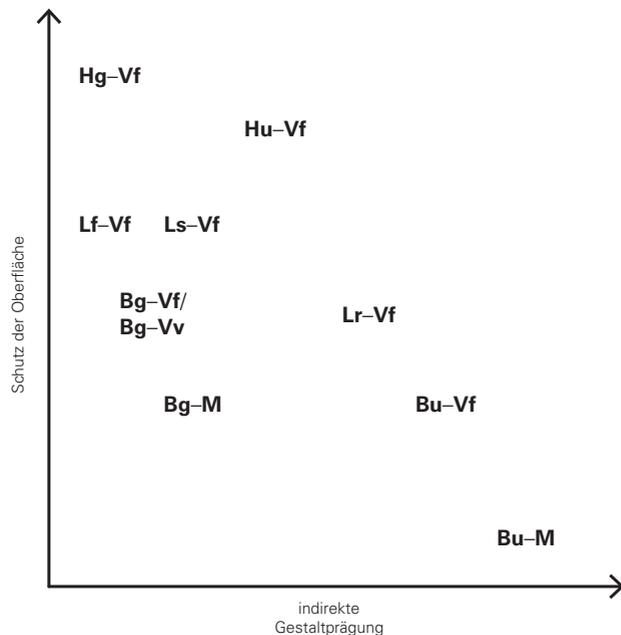


Abb. 5-113: Einordnung der Typen hinsichtlich ihrer Schutzwirkung und indirekten Gestaltprägung

Darüber hinaus eröffnet sich hier eine differenziertere Perspektive auf die Wirkungsweise von Erosionsleisten. Wird die indirekte Gestaltprägung – auch im Sinne der eingangs geforderten, integrierten Betrachtung – als zweite Achse in das auf S. 267 gezeigte Ordnungsdiagramm zur Schutzwirkung eingefügt, und den Typen ein zusätzlicher Wert zugeordnet³⁴ (Abb. 5-113), so zeigt sich die negative Korrelation beider Wirkungen: je geringer der Schutz, desto größer der indirekte, gestaltprägende Einfluss als Resultat des Erosionsprozesses.³⁵ Zudem werden Unterschiede zwischen Leistentypen mit ähnlichem Schutzgrad deutlich, wie etwa bei den Typen Bg-Vf/Bg-Vv und Lr-Vf. Diese unterscheiden sich klar hinsichtlich der Art der erzeugten Erosionsbeanspruchung, welche sich wiederum auf die Gestalt der Wandoberfläche auswirkt. Während die Typen Bg-Vf/Bg-Vv eine eher gleichmäßig verteilte Erosion bewirken, wird durch Typ Lr-Vf eine Bündelung der Erosion in bestimmten Bereichen der Mauersteine bewirkt, und hierdurch die Wandoberfläche stärker geformt. Auch kann bereits ein minimaler Unterschied im Schutzgrad einen starken Einfluss auf die Gestaltwirksamkeit haben, wie etwa bei den Typen Hg-Vf/Hu-Vf (→ S. 188/S. 200). Wenngleich die Minderung der Gesamt-Schutzwirkung aufgrund der ungleichförmigen Wirkungsweise hier eher gering ist, entsteht doch eine wesentlich deutlichere, direktere Abbildung des Erosionsprozesses.

5.4.5 Gesamtbeurteilung

Abschließend lassen sich einige übergeordnete Potentiale und Grenzen des Gebrauchs von Erosionsleisten benennen.

Wie durch die Untersuchungen in diesem Kapitel gezeigt, bieten Erosionsleisten zur Erfüllung der an sie gestellten Anforderungen eine Vielzahl von Optionen. Über die unterschiedlichen Grundtypen hinaus spielt hierbei auch die konkrete Ausgestaltung des Typs für den jeweiligen Anwendungsfall – welche in den Studien nur exemplarisch, jeweils anhand eines Beispiels, gezeigt wird – eine

³⁴ Auch diese Einordnung basiert auf den in den Studien vorgenommenen Abschätzungen hinsichtlich des Einflusses der Leistentypen auf den Erosionsprozess.

³⁵ Im Übrigen zeigt sich in den Studien auch ein Zusammenhang zwischen indirekter und direkter Gestaltprägung. Mit abnehmender indirekter Wirkung (also mit zunehmender Schutzwirkung und damit einhergehender, größerer materieller Präsenz) werden Erosionsleisten stärker direkt gestaltwirksam (z. B. Studien Hg-Vf und Hg-Vf_25, → S. 186 sowie S. 192). Insofern besteht auch hier eine umgekehrte Entsprechung: die Gestaltprägung erfolgt, je nach Typus der Erosionsleiste, entweder stärker direkt oder indirekt – die ursprüngliche Gestalt wird eher bewahrt, oder aber transformiert.

Studie	Anzahl Elemente	Herstellung
Hg-Vf	1	Strangpresse
Hg-Vf_25	1	Strangpresse
Hu-Vf	1	Form
Lf-Vf	3	Form
Lr-Vf	1	Form
Ls-Vf/M	2	Form
Bg-Vf	1	Strangpresse
Bg-Vv	1	Strangpresse
Bu-Vf	1	Form
Hg/Bg-Vf	2	Strangpresse

Tab. 5-5: Anzahl der benötigten, unterschiedlichen Elemente, und Art der Herstellung

wichtige Rolle (vgl. S. 164). Gerade was z. B. ungleichförmige Wirkungsweisen betrifft, sind neben den hier gezeigten viele weitere Umsetzungen, etwa durch andere Leistenformen, denkbar.

Was mögliche Gebrauchsszenarien der Typen angeht, ist eine Differenzierung zwischen Breitenanwendung und Sonderfällen sinnvoll. Bei einigen Typen – vor allem jenen mit der Wirkungsweise des Ableitens, also Lf-Vf, Lr-Vf und Ls-Vf – werden in den Untersuchungen Grenzen des Gebrauchs ersichtlich, welche diese für eine breitere Anwendung eher ungeeignet erscheinen lassen. Diese Grenzen liegen vor allem im relativ hohen Erstellungsaufwand der Typen im Verhältnis zum Grad ihrer Schutzwirkung. Der Erstellungsaufwand vorgefertigter Leisten ist abhängig von der verwendeten Herstellungsweise, aber auch von der Anzahl der benötigten, unterschiedlichen Leistenelemente, sowie der Fertigungstechnik (vgl. Tab. 5-5). Zudem sind die genannten Typen sehr eigenständig in ihrem Ausdruck, und somit nur in eingeschränktem Maße an unterschiedliche gestalterische Kontexte anpassbar. Aus diesen Gründen eignen sie sich primär für Sonderfälle, d. h. für Anwendungen, bei denen

die gestalterischen Charakteristika der Typen von besonderem Wert sind. Typ Lf-Vf beispielsweise erfordert einen hohen Erstellungsaufwand, bietet jedoch – etwa im Vergleich mit Typ Bg-Vf – einen höheren Schutz bei gleichzeitig relativ glatter Fassadengestalt, also ohne größere Leistenüberstände (vgl. Typen Hg-Vf, Hu-Vf) verwenden zu müssen.

Gleiches gilt für die Herstellungsweise Vv (Verbund mit Lehmstein) im Allgemeinen. Im Vergleich mit Herstellungsweise Vf bedeutet sie in der Regel einen höheren Erstellungsaufwand und größere Leisten-Ansichtsbreiten (→ Studie Bg-Vv, S. 242), bei geringerer möglicher Schutzwirkung. Sie bietet sich jedoch in Fällen an, in denen ein besonders guter Verbund mit dem Lehmstein von Bedeutung ist (vgl. S. 271 f.).

Das größte Potential für eine Breitenanwendung ist dagegen bei den Typen Bg-M, Bg-Vf sowie Hg-Vf zu erkennen. Typ Bg-M nimmt hierbei eine Sonderstellung ein. Dieser ermöglicht lediglich einen Basisschutz, weist jedoch im Vergleich mit allen anderen Typen die mit Abstand einfachste und effizienteste Herstellung auf. Typ Hg-Vf, auf der anderen Seite, bietet einen sehr hohen Schutz bei gleichzeitig moderatem Herstellungsaufwand. Typ Bg-Vf schließlich eignet sich, aufgrund seiner besonderen Ausgewogenheit von Erstellungsaufwand und Schutzwirkung, gut als Standardlösung für Regel-Anwendungsfälle mit durchschnittlichen Anforderungen.

Zudem ist diesen drei Typen eine gewisse Einfachheit und Flexibilität im Ausdruck gemein, welche es ermöglicht, sie unter verschiedenen gestalterischen Rahmenbedingungen, bzw. zur Verfolgung unterschiedlicher ästhetischer Ziele zu verwenden. So bietet Typ Bg-M ein äußerst zurückgenommenes, an traditionelle Stampflehmgebäude erinnerndes Erscheinungsbild. Bei den Typen Bg-Vf und Hg-Vf hingegen stellt die dominierende Horizontale eine neutrale Grundlinie dar, welche sich jedoch – über Parameter wie der Stärke und dem Überstand der Leiste – in ihrem Ausdruck variieren lässt.

Speziell hervorzuheben ist darüber hinaus die Option der Ungleichförmigkeit der Wirkungsweise, da in den entsprechenden Typenvarianten (Hu-Vf, Bu-M und Bu-Vf) ein besonderes Potential der indirekten Gestaltprägung erkannt wird (vgl. S. 270). Über das Austarieren des Grades der Ungleichförmigkeit kann dabei zwischen funktionalen und gestalterischen Zielen vermittelt werden. Hierin zeigt sich eine bei Erosionsleisten charakteristische Verschränkung funktionaler und gestalterischer Aspekte des Gebrauchs, welche im Folgenden näher beleuchtet werden soll.

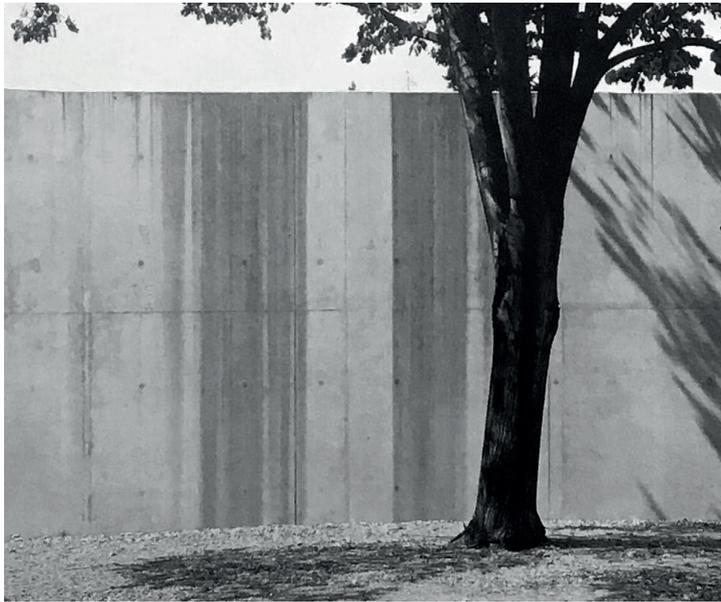


Abb. 5-114: Studio Zaugg, Herzog & de Meuron, Mulhouse, 1996



Abb. 5-115: Brise Soleils am Mill Owners' Association Building, Ahmedabad, Indien (Le Corbusier)

5.4.5.1 Steuerung der Erosion

Üblicherweise sind architektonische Element und Bauteile – wie etwa Dach, Fenster oder Treppe – lediglich direkt gestaltprägend: sie erfüllen primär konstruktive und funktionale Aufgaben, und haben im Zusammenhang damit Einfluss auf die Gestalt des Gebäudes. Bei Erosionsleisten hingegen besteht die besondere, indirekte Gestaltwirksamkeit nicht *im Zusammenhang mit*, sondern vielmehr *durch* ihre Funktion.

In ähnlicher Weise ist dies z. B. der Fall bei Sonnenschutzelementen wie Brise Soleils. Auch bei diesen entsteht Gestalt mittels der Funktion, hier des Schattenwurfs (Abb. 5-115), wobei diese Wirkung weder permanent ist, noch dauerhafte Spuren hinterlässt. Ebenso lassen sich Parallelen zu entwerflichen Konzepten ziehen. Beim Studio Rémy Zaugg in Mulhouse (Herzog & de Meuron, 1996) etwa wird die Notwendigkeit der Dachentwässerung als Gestaltungselement genutzt, indem das Regenwasser mehr oder weniger kontrolliert über die Fassade geleitet wird (Abb. 5-114).³⁶ Über die entstehenden Verfärbungen bildet sich der natürliche Vorgang auf der rohen Betonhaut ab. Das eigentliche Mittel, welches die Gestalt herbeiführt³⁷, bleibt hier jedoch verborgen.

Wie in diesen Beispielen beeinflusst bei Erosionsleisten die Funktions- bzw. Wirkungsweise *als solche* die Gestalt. Die Leiste ist dabei das Mittel, durch welches sich eine Gestaltprägung des Erosionsprozesses vollzieht. Somit scheint es hier – die Darstellung in Abschnitt 5.1 (vgl. Abb. 5-3, S. 136) präzisierend – sinnvoll zu sein, die Bereiche der Funktion und der Gestalt nicht nur als eng zusammenhängend, sondern eher als ineinander übergehend bzw. in Teilen deckungsgleich zu betrachten. Es existiert eine Schnittmenge der Aufgaben des Erosionsschutzes und des Beitrags zur Gestaltqualität, innerhalb derer beide als Einheit anzusehen sind (Abb. 5-116, folgende Seite). Diese Schnittmenge soll als Bereich der Steuerung der Erosion bezeichnet werden.

³⁶ In ähnlicher Weise setzten Herzog & de Meuron dies auch beim Projekt der Lagerhalle für Ricola aus dem Jahr 1993 um.

³⁷ die Attikaausbildung bzw. Gefälleausbildung der Dachhaut

Verhandlungsrahmen

Die Steuerung der Erosion ist für den Gebrauch von Erosionsleisten von zentraler Bedeutung. Als gedanklicher Rahmen im Entwurfsprozess fördert sie eine direkte Verhandlung funktionaler und gestalterischer Aspekte (Abb. 5-117), und ermöglicht hierdurch die Herstellung eines für den konkreten Anwendungsfall ausgewogenen Verhältnisses der Grade der Schutzwirkung und des Zulassens der Erosion.

Verhandlungsspielraum auf Seiten der funktionalen Aspekte bieten dabei einige der in Abschnitt 5.1.1.1 (vgl. S. 137) erwähnten Einflussfaktoren der Schutzanforderung, bei welchen zwischen unveränderlichen, bedingt veränderlichen, sowie veränderlichen Faktoren unterschieden werden kann.

Unveränderliche Faktoren sind – etwa durch den natürlichen Kontext, die beabsichtigte Nutzung, oder baukonstruktive Randbedingungen – fest vorgegeben, und daher kaum verhandelbar. Hierzu zählen etwa die lokale Beanspruchungssituation, die beabsichtigte Gebäudelebensdauer, oder die gegebene Überdimensionierung der Wand (vgl. S. 138). Bedingt veränderliche Faktoren dagegen stellen sich, je nach konkretem Fall, als entweder veränderlich oder unveränderlich dar. So können etwa die Material- oder die Ausführungsqualität, abhängig von den Rahmenbedingungen, vorbestimmt oder beeinflussbar sein. Veränderliche Faktoren schließlich sind nicht durch äußere Bedingungen bestimmt, sondern geben die subjektiven Erwartungen der Projektbeteiligten wieder. Sie können sich im Laufe der Zeit ändern, und sind grundsätzlich verhandelbar. Beispiele hierfür sind das individuelle Sicherheitsbedürfnis, die Akzeptanz von Maßnahmen der Instandhaltung und Reparatur, oder die Wertschätzung der Erosion in ästhetischer Hinsicht.

Die Ausprägung dieser veränderlichen Faktoren im jeweiligen Fall hat wesentlichen Einfluss auf das mögliche Maß der indirekten Gestaltprägung. Ist beispielsweise das individuelle Sicherheitsbedürfnis hoch, so ist ggf. ein höherer Schutz als objektiv betrachtet notwendig umzusetzen, um Vertrauen in den Baustoff zu schaffen. In der Folge verbleibt sehr wenig Raum für die indirekte Gestaltprägung. Bei einem geringen Sicherheitsbedürfnis hingegen kann sich die Gesamt-Schutzanforderung signifikant verringern, und hierdurch die Gestaltwirksamkeit des Erosionsprozesses deutlich stärker zur Geltung kommen.

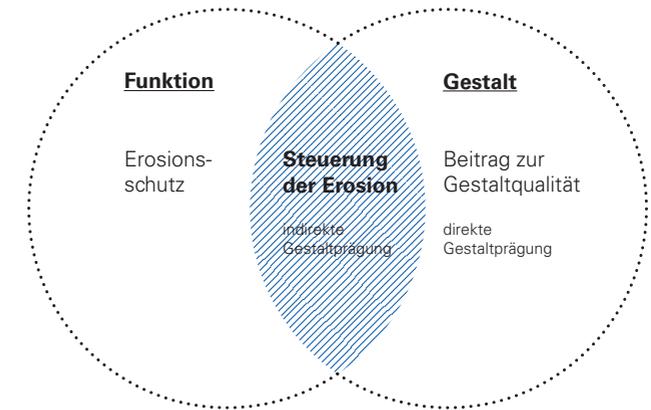


Abb. 5-116: Bereich der Steuerung der Erosion



Abb. 5-117: Verhandlungsrahmen (Steuerung der Erosion)

Für die konkrete Umsetzung stehen dabei nicht allein unterschiedliche Grundtypen von Erosionsleisten zur Wahl – auch die entwerfliche Ausformulierung bzw. Art der Anwendung der Typen bietet diverse Möglichkeiten. So kann etwa bei Typ Hg–Vf (→ S. 188) der Leistenüberstand je nach örtlicher Beanspruchungssituation so gewählt werden, dass eine Ausgewogenheit zwischen der Stärke des erzeugten Schutzes und der Gestaltprägung durch die Erosion erreicht wird. Bei den Typen Lf–Vf, Lr–Vf und Ls–Vf wiederum besteht Verhandlungsspielraum bezüglich der Dimensionierung der Rinnenquerschnitte. Hier kann, wie in den Studien gezeigt, eine Auslegung auf äußerst selten anfallenden Regenmengen erfolgen, oder aber ein Überlaufen der Rinne in diesen Fällen einkalkuliert werden, was deutlich filigranere Rinnen ermöglicht. Auch bei Typ Bu–Vf (→ S. 254) lässt sich, abhängig vom konkreten Anwendungsfall, durch die formale Ausgestaltung der Leiste eine Balance von Schutzwirkung und beabsichtigten gestalterischen Qualitäten erzeugen.

Als Hintergrund dieser Verhandlung funktionaler und gestalterischer Belange kann der zuvor definierte ökologische Leitsatz (vgl. Abb. 5-117 und S. 144) dienen, welcher eine sparsame Verwendung von Zement und Kalk als Anforderung an den Gebrauch von Erosionsleisten stellt. Wie sich in den Untersuchungen zeigt, fällt das Maß des Verbrauchs dieser Stoffe tendenziell umso größer

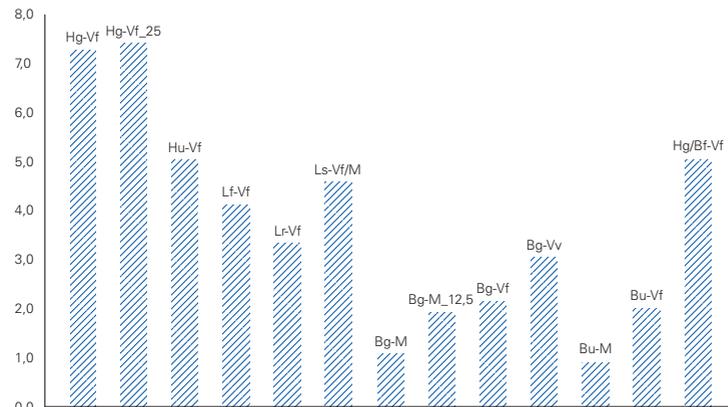


Abb. 5-118: Zementverbrauch (in kg/m² Wandfläche) der in den Anwendungsstudien gezeigten Erosionsleisten (inkl. vertikale Leisten)

aus, je höher die Schutzwirkung der Erosionsleiste ist. In Abb. 5-118 ist der Zementverbrauch der in den Anwendungsstudien gezeigten Erosionsleisten – inklusive der vertikalen Leisten, als auch dem Verbrauch an Kalk (als Zement-Äquivalent betreffend der CO₂-Emissionen bei der Herstellung) – dargestellt.³⁸ Der auch hier ersichtliche Zusammenhang zwischen der Schutzwirkung der Leiste und dem Verbrauch an Zement bzw. Kalk ist ein wichtiges Argument dafür, die Schutzwirkung auf das jeweils notwendige Maß zu begrenzen. Nicht zuletzt resultiert hieraus, durch die indirekte Gestaltprägung, ein potentieller ästhetischer Mehrwert (z. B. → Studie Bu–M, S. 248).

Zudem können auch andere Arten der Verwendung in Betracht kommen. Wenngleich eine Stabilisierung grundsätzlich nachteilig ist (vgl. S. 144), kann sie in bestimmten Fällen, und für einzelne Sondersteine, in Erwägung gezogen werden, und hierdurch Zement bei der Erstellung von Erosionsleisten einsparbar machen (→ Studie Ls–Vf/M, S. 218). Im Vergleich von Studie Ls–Vf/M und Studie Lf–Vf (→ S. 206), welche einen ähnlichen Grad der Schutzwirkung aufweisen, zeigt sich jedoch rechnerisch (selbst bei Stabilisierung lediglich der vorderen, oberflächennahen 5 cm) keine Einsparung (vgl. Abb. 5-118). Eine solche ist ggf. durch die Reduktion des Grades der Stabilisierung – also die Verringerung der Erosionsbeständigkeit der Sondersteine – auf das lokal erforderliche Minimum erreichbar.

Gestaltungsmasse

Durch die beschriebene Verhandlung von Funktion und Gestalt im Sinne der Steuerung der Erosion kann flexibel auf die konkreten Anforderungen im jeweiligen Fall reagiert, und ein angemessener Grad des Schutzes umgesetzt werden. Die Spanne reicht dabei von einer maximalen Schutzwirkung (→ Studie Hg–Vf, S. 188) bis hin zu einer größtmöglichen Reduktion des Zementverbrauchs, und einer damit einhergehenden, maximalen Ermöglichung indirekter Gestaltprägung (→ Studie Bu–M, S. 248).

³⁸ Zur Ermittlung des Verbrauchs wird von einem Zementgehalt von 350 kg/m³ Feinbeton ausgegangen. Bei Studie Bg–Vf beispielsweise ergibt sich aus der Querschnittsfläche der horizontalen Erosionsleiste von 29 cm² somit ein Zementverbrauch von 2 kg je m² Wandfläche.

Für Mörtelleisten wird von einem Kalkverbrauch von 25 % Volumenanteil ausgegangen. Ein Volumengewicht von 960 kg/m³ zugrunde legend, weist eine vertikale Mörtelleiste (Querschnittsfläche 10 cm²) daher einen Verbrauch von 0,2 kg Kalk auf. Da bei Kalk von etwa der Hälfte der CO₂-Emissionen im Vergleich mit Zement ausgegangen werden kann, ergibt sich ein Zement-Äquivalent von 0,1 kg.

Bei Studie Ls–Vf/M wird zudem der Zementverbrauch zur Stabilisierung der Sondersteine berücksichtigt. Dabei wird von einer Stabilisierung der vorderen 5 cm des Steinquerschnitts, bei einem Zementverbrauch von 130 kg/m³ Stampflehm ausgegangen.

In letzterem Fall führt die Steuerung der Erosion zum bewussten Zulassen eines Grades der Erosion, welcher nach herkömmlicher Betrachtungsweise zunächst negativ und auf einfache Weise verhinderbar erscheint. Jedoch handelt es sich bei Stampflehm um einen extrem verfügbaren und günstigen, in vielen Fällen kostenlosen Baustoff. Die noch relativ hohen Produktions- und Verarbeitungskosten könnten – eine serielle Produktion von Elementen sowie breitere Anwendung vorausgesetzt – in Zukunft deutlich sinken. Auch stellen Auswaschungen bei Lehm, anders als bei manch anderem Baustoff, keinerlei Belastung der Umwelt dar. Darüber hinaus ist, wie oben (vgl. S. 138) beschrieben, meist bereits eine Überdimensionierung der Wand gegeben, weshalb sich ein Teil der Wandquerschnitts als Opferschicht nutzbar machen lässt. Aus diesen Gründen erscheint gerade hier eine „Opferung“ von Material als Verhandlungs- bzw. Gestaltungsmasse vertretbar.

6 Resümee

6.1 Fazit und Diskussion

Mit dieser Arbeit wird der Versuch unternommen, über die Thematisierung einer eng umgrenzten Fragestellung innerhalb des Stampflehmbaus einen Beitrag zu seiner allgemeinen Verbreitung zu leisten.

Am Anfang steht dabei die Vermutung, dass die Anwendung des Prinzips der kalkulierten Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk besonderes funktionales als auch ästhetisches Potential birgt, und eine zukunftsweisende Richtung für den Stampflehm- bau aufzeigen kann. Hiervon abgeleitet wird die Fragestellung, auf welche Weisen diese Anwendung erfolgen kann.

Aufbauend auf einer Darstellung des Standes der Forschung und Technik (Kapitel 2), sowie der Erarbeitung wichtiger Grundlagen (Kapitel 3), werden in entwurflich-praktischen Studien (Kapitel 4) zunächst Möglichkeiten der Umsetzung ausgelotet. Im Zuge dieser explorativen Untersuchungen zeigt unter verschiedenen Mitteln das Element der Erosionsbremse die größte Eignung. Einer entsprechenden Eingrenzung der Ausgangsfragestellung nachgehend, erfolgt schließlich eine zielgerichtete Untersuchung unterschiedlicher Wirkungs- und Herstellungsweisen leisten- und plattenförmiger Fassadenelemente, für welche die neue Bezeichnung *Erosionsleisten* eingeführt wird (Kapitel 5).

Angesichts der Qualitäten, welche die hier untersuchten Strategien und Mittel aufzeigen, kann das Potential der kalkulierten Erosion bei Stampflehm-Mauerwerk eindeutig bestätigt werden. So zeigt sich, dass durch diese nicht nur der Schutz vor Erosion gewährleistet ist, sondern ebenso ein positiver Einfluss auf die Bauteilgestalt genommen werden kann. Deutlich wird insbesondere das Potential der Erosionsleiste, welche sich nicht nur als besonders geeignet für die Übertragung der kalkulierten Erosion erweist, sondern mit diesem Transfer in einem wesentlichen Zusammenhang steht. Dies zeigt sich in zweierlei Hinsicht.

Zunächst kommt der Erosionsleiste eine wesentliche Bedeutung im Bereich der direkten Gestaltprägung zu. Im Gegensatz zur gängigen Praxis beim Bauen mit Stampflehm-Großblöcken (vgl. S. 41) entsteht durch den Gebrauch von Erosionsleisten eine gestalterische Akzentuierung der Fugen. Deren Vorhandensein wird hierdurch nicht nur akzeptiert, sondern, wie es etwa auch Roger

Boltshauser fordert, positiv umgedeutet.¹ Auf diese Weise, im Spannungsfeld zwischen der Fortschreibung traditioneller Gestaltmerkmale und einer neuen Artikulation (vgl. S. 139), unterstützen die Erosionsleisten die Herausbildung einer eigenständigen gestalterischen Identität der Stampflehm-Mauerwerksbauweise.

Zudem resultiert aus der Anpassung der Erosionsbremse an die Mauerwerksbauweise eine deutliche Erweiterung ihres Einsatzspektrums. Hierdurch wiederum entstehen einerseits neue Anforderungen an ihren Gebrauch – so vor allem der Schutz der horizontalen und vertikalen Fugen. Andererseits werden neue Wirkungsweisen der Erosionsleisten, welche diesen Anforderungen gerecht werden, zum Teil erst durch die Mauerwerksbauweise ermöglicht. Hier sind vor allem die Möglichkeiten der Integration der Leisten in das Wandbauteil zu nennen, welche sich aus der Existenz der Fugen als auch der kleinteiligen Vorfertigung der Lehmsteine ergeben. Insbesondere

¹ vgl. Boltshauser 2019, S. 158. Boltshauser plädiert hier für eine Nutzung der Fuge und ein Zeigen der Struktur, in Abkehr von der üblichen Retusche der Fugen beim Einsatz vorgefertigter Stampflehmelemente.

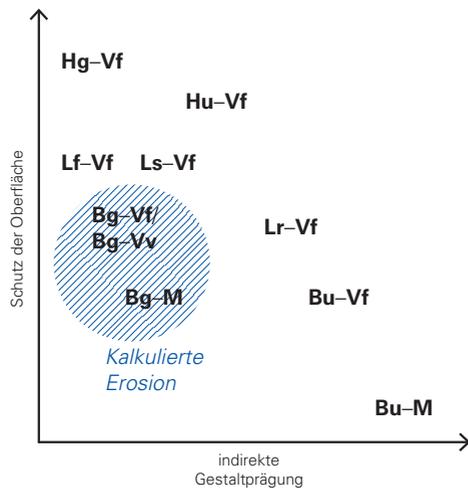


Abb. 6-1: Bereich der Kalkulierten Erosion innerhalb des Spektrums der Gesteuerten Erosion



Abb. 6-2: Zusammenhang zwischen Ableitung der Erosionsleiste und Transfer in die Mauerwerksbauweise

re aus der Lage der Leisten in bzw. an den Elementfugen ergibt sich eine große Selbstverständlichkeit ihres Gebrauch (vgl. S. 130).

In Präzisierung des Schaubilds auf S. 133 (Abb. 5-1) kann die Ableitung der Erosionsleiste von der Erosionsbremse somit als direktes Resultat ihres Transfers in die Mauerwerksbauweise, und also der Erweiterung ihres Funktionsspektrums, gesehen werden (Abb. 6-2).

Erweiterung der kalkulierten Erosion

So wie der Schritt zur Erosionsleiste eng mit diesem Transfer zusammenhängt, so entsteht, auf übergeordneter Ebene, durch die Überführung der kalkulierten Erosion das Konzept der gesteuerten Erosion. Aufbauend auf der kalkulierten Erosion, und inspiriert durch traditionelle Techniken, adaptiert die Steuerung der Erosion diese für die Mauerwerksbauweise.

Dabei erweitert sie – sowohl was die Schutzwirkung, als auch die Gestaltprägung angeht – das Anwendungsspektrum der kalkulierten Erosion, und ermöglicht so eine Flexibilisierung des bewitterten Einsatzes von Stampflehm (Abb. 6-1). Über eine Bandbreite unterschiedlicher Beanspruchungssituationen hinweg ermöglicht sie ein differenziertes, angemessenes Reagieren auf die jeweilige Schutzanforderung, bei einem geringstmöglichen Verbrauch CO₂-intensiver Baustoffe wie Kalk und Zement. Darüber hinaus stellt sie einen Rahmen dar, innerhalb dessen je Anwendungsfall die Bedeutung der Gestaltprägung gegenüber der zu erfüllenden Schutzanforderung gewichtet, und eine Balance zwischen diesen hergestellt werden kann. Dabei wird die Erosion nicht nur akzeptiert und als gegebenes Gestaltungselement aufgegriffen, sondern – vor allem im Zuge einer Minimierung des Einsatzes von Zement und Kalk – als gestalterische Kraft verstanden, welche sich aktiv nutzen lässt.

Die Steuerung der Erosion vermittelt somit zwischen verschiedenen Anforderungen. Auf der einen Seite steht die Notwendigkeit der Regelung des Vorgangs, ohne die in manchen Fällen eine unkontrolliert fortschreitende Verwitterung stattfinden würde. Um die Dauerhaftigkeit des Bauteils sicherzustellen, müssen dem Erosionsprozess daher meist Grenzen gesetzt werden. Auf der anderen Seite legen ökologische als auch gestalterische Erwägungen nahe, die Erosion nicht unnötig „aufzustauen“, sondern ihr einen gewissen Entspannungsraum zuzugestehen.²

Grade der Kontrolle

In diesem Austarieren von Kontrolle und Zulassen zeigt die Steuerung der Erosion Parallelen zu ingenieurtechnischen und gestalterischen Eingriffen in die Landschaft.

Lawinenschutzbauwerke etwa sind ein Beispiel für eine Intervention auf funktionaler, technischer Ebene, durch die ein natürlicher Vorgang kontrollierbar gemacht wird. In Abb. 6-3 gezeigt ist ein sogenannter Lawinenschutz-Umlenkdam, welcher den benachbarten Ort schützt, indem er Schneemassen auffängt, und sie auf eine freie Fläche umleitet.

In der Landschaftsarchitektur wiederum spielen gestalterische Strategien eine wichtige Rolle. Der Franzose Michel Desvigne erstellte in den 1980er Jahren einige theoretische, zeichnerische Arbeiten, in denen er „mit dem fundamentalen physischen Dialog [experimentiert], welcher auf verschiedenen Ebenen zwischen natürlichen Phänomenen und Konstruktion besteht“³. Dabei untersuchte er Gestaltungsstrategien, welche sich die Kräfte der Natur zunutze machen. In *Jardins Élémentaires* (Abb. 6-4) wird der Erosionsprozess in einem Flusstal mithilfe künstlicher Dämme so manipuliert, dass sich die Landschaft kontinuierlich umformt, und sich ständig ändernde Muster aus Wasserläufen und Sandbänken erzeugt werden. In *Jardins Flottantes* arbeitete Desvigne mit weiteren architektonischen Objekten, die formgenerierende Mechanismen in Gang setzen, wie zum Beispiel Windkorridore, welche die Position von Dünen beeinflussen.⁴

Ein Bereich innerhalb der Landschaftsarchitektur, in welchem funktionale und gestalterische Aspekte des Eingriffs besonders eng zusammenkommen, ist die Planung urbaner Fließgewässer. Prominski et al. entwickelten hier Werkzeuge der Verhandlung



Abb. 6-3: Lawinenschutz-Umlenkdam, Mittenwald, 2017

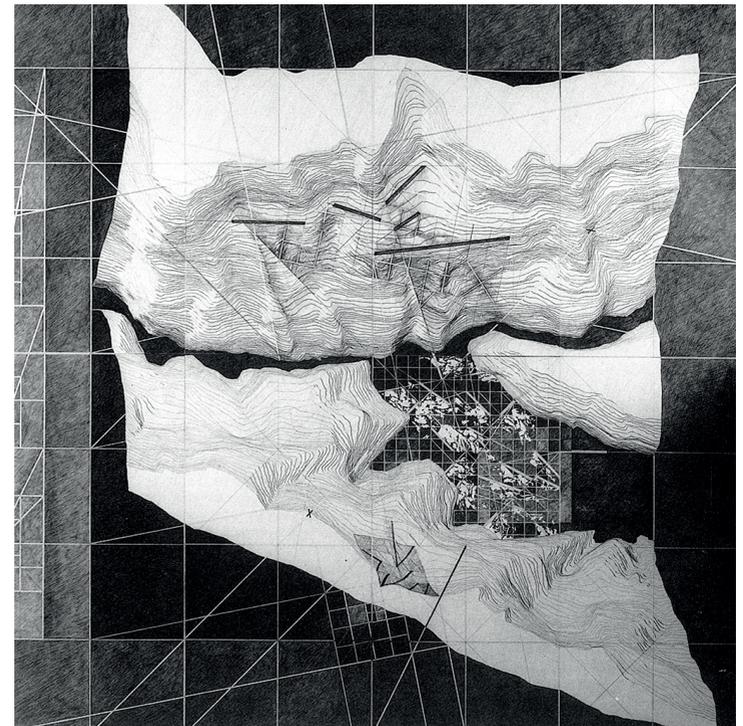


Abb. 6-4: Michel Desvigne, Jardins Élémentaires, 1988

² vgl. Rauch 2010, S. 113

³ Desvigne o. D. –1 (Freie Übersetzung aus franz. Original)

⁴ vgl. Desvigne o. D. –2



Abb. 6-5: Renaturierungsprojekt Lossedelta, Kassel, 2005

von Anforderungen an den Erosions- und Hochwasserschutz auf der einen, sowie an die natürliche Entfaltungsmöglichkeit des Gewässers und die Gestaltung der Uferkanten auf der anderen Seite. Zu diesen zählt die Definition von „Prozessgrenzen“, welche die Laufentwicklung des Gewässers sanft kontrollieren.⁵ Die Prozessgrenzen beschreiben den Raum, in dem Erosions- und Sedimentationsprozesse möglich sind – in welchem der Flusslauf sich also eigendynamisch verändern kann (Abb. 6-5).⁶

Wie in diesen Beispielen geht es auch bei den in der Arbeit untersuchten Strategien um eine behutsame Manipulation und hierdurch gestaltende Beeinflussung eines natürlichen Vorgangs.

Modulation des Stoffkreislaufs

Und so verweist die Idee der gesteuerten Erosion auch auf größere Zusammenhänge. Sie stellt – um auf den Ursprungsgedanken zurück zu kommen – ein Konzept planerischen Eingreifens in den natürlichen Materialkreislauf des Baustoffs (vgl. S. 16) dar. Sowohl Schutz als auch gestalterischer Ausdruck der Wand ergeben sich durch die Modulation dieses Eingreifens – von der Verhinderung jeglicher Erosion bis hin zur bewussten „Opferung“ von Material. Den Erosionsleisten, als Instrumenten der konkreten Umsetzung, kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Sie setzen die Prozessgrenzen, die Leitplanken, innerhalb derer der natürliche Veränderungsprozess

5 vgl. Prominski et al. 2012, S. 29

6 vgl. Prominski et al. 2012, S. 32

abläuft und sich abbildet. Als fixe Bezugslinien vor dem Hintergrund kontinuierlicher Transformation stärken sie zudem dessen Wahrnehmbarkeit.

In Fällen, in denen es erforderlich oder speziell erwünscht ist, kann eine stärker geregelte Anwendung gewählt, und so Vertrauen in Baustoff und Bauweise geschaffen werden. Hierdurch können diese in einer Vielzahl unterschiedlicher Beanspruchungssituationen erprobt werden, und eine schrittweise Fortentwicklung der Technik stattfinden. Denn der bewitterte Einsatz von Lehm birgt eine nicht zu unterschätzende Verantwortung – mühsam erarbeitetes, heute erst allmählich neu entstehendes Vertrauen in den Baustoff darf nicht leichtfertig wieder verspielt werden.^{7,8} Nicht zuletzt erhält die Möglichkeit, ein hohes Maß an Kontrolle umsetzen zu können, zudem dadurch Bedeutung, dass aufgrund des Klimawandels in Zukunft mit einer größeren Häufigkeit von Wetterextremen wie Starkregenereignissen zu rechnen ist.⁹

Einen verantwortungsvollen Umgang vorausgesetzt, kann jedoch, wo immer möglich, der Einsatz von Kalk bzw. Zement auf das nötige Minimum reduziert, und hierdurch eine stärkere Formung der Architektur durch die Erosion zugelassen werden. Durch die indirekte Gestaltprägung der Erosionsleisten wird, stärker noch als bei der kalkulierten Erosion, der natürliche Prozess sichtbar gemacht und der Wand eingeschrieben. So entsteht, wie bei Desvigne, ein Gestalten mit oder besser *durch* den Prozess: ein Gestalten durch die Erosion. Auf diese Weise wird deren Umdeutung zu einem positiv bewerteten Veränderungsprozess weiter gefördert. Wie Ponte über einige Beispiele vernakulärer Architektur, etwa die Raqaf-Bauweise, schreibt, tritt erst durch die Nutzung der „Schwäche“ des Materials dessen spezifischer architektonischer Ausdruck hervor.¹⁰ In diesem Sinne plädiert auch die Architektin Anna Heringer dafür, dass wir die Verletzlichkeit des Lehms *„akzeptieren, ja, sie sogar zelebrieren.“*¹¹

So unterschiedlich die Anforderungen und Erwartungen an den bewitterten Gebrauch von Stampflehm ausfallen, so vielfältig erscheinen die Möglichkeiten, diesen zu begegnen. Die in der Arbeit untersuchten Strategien zeigen, dass dabei über das beschriebene

7 vgl. Houben, Guillaud 1994, S. 332

8 vgl. z. B. Rauch 2010, S. 112

9 vgl. Europäische Umweltagentur EEA 2017

10 Ponte 2012, S. 165. *„Die Fassaden interagieren mit der Erosion und nehmen sie als formende Kraft an. Auf diese Weise nutzt der Lehm seine eigene Schwäche und verwandelt ein negatives Merkmal in seinen spezifischen architektonischen Ausdruck.“* (Freie Übersetzung aus port. Original)

11 vgl. Heringer 2019

Spektrum zwischen Kontrolle und Nicht-Kontrolle hinweg – also sowohl durch einen weitestgehend geschützten Einsatz, als auch durch das Zulassen oder gar Fördern der Erosion – jeweils angemessene Anwendungen des Baustoffs möglich sind, und so ein Beitrag zur Steigerung der positiven Wahrnehmung seines Gebrauchs geleistet werden kann.

6.2 Ausblick

Ferner bietet die Arbeit auch eine Grundlage für weitergehende Untersuchungen. Auf verschiedenen Ebenen werden Fragen aufgeworfen, welche als Anknüpfungspunkte dienen können.

Erosionsleisten

Die Kernergebnisse der Arbeit betreffend, bleibt zunächst die Praxistauglichkeit der behandelten Prinzipien und Mittel, insbesondere der Erosionsleisten, näher zu untersuchen. Ein nächster Schritt wäre daher die realitätsnahe Erprobung und experimentelle Anwendung einzelner Leistentypen, welche z. B. anhand eines größeren Mock-Ups, im Langzeitversuch unter natürlichen Witterungsbedingungen, erfolgen könnte. Allein hierdurch erscheint eine detailliertere Bewertung funktionaler und gestalterischer Aspekte von Erosionsleisten möglich. Ebenso denkbar ist die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Laborversuchen, welche Rückschlüsse auf den Einsatz unter natürlichen Bedingungen zulassen (vgl. S. 66).

Ein sinnvoller weiterer Schritt könnte die Entwicklung eines Leitfadens für die Anwendung sein, in welchem die Eignung der Typen abhängig von bestimmten Parametern des Gebrauchs – wie etwa der lokalen Schlagregenbelastung oder der Materialqualität – angegeben wird. Als konkretes Planungswerkzeug der Steuerung der Erosion könnte ein solcher Leitfaden den Anwender dabei unterstützen, eine für den speziellen Fall angemessene Auswahl zu treffen.¹² Notwendige Grundlage hierfür wäre jedoch ein Klassifikationssystem, welches unterschiedliche Expositionsklassen (z. B. in Anlehnung an die DIN EN ISO 15927-3, vgl. S. 57 f.) als auch Qualitätsklassen für Material und Verarbeitung definiert.

Ebenso besteht weiterer Untersuchungsbedarf, was die Herstellung von Erosionsleisten angeht. Ein mögliches Thema wäre hier die bereits angesprochene Faserarmierung zur Erhöhung der Bruchfestigkeit, da meist, sowohl in gestalterischer Hinsicht, als auch aus Gründen der Materialökonomie, die Verwendung möglichst filigraner Leisten wünschenswert ist.

¹² Eine einfache Form eines solchen Leitfadens ist z. B. im Holzbau, für die Bestimmung der notwendigen Dauerhaftigkeit der zu verwendenden Holzart, gebräuchlich (siehe DIN EN 350, DIN 68800-1).

Bei Mörtelleisten hingegen sollte die Notwendigkeit eines Gefälles auf der Oberseite (vgl. S. 169) durch weitergehende Untersuchungen überprüft werden.

Darüber hinaus sind für vorgefertigte Leisten grundsätzlich auch weitere Materialien, wie beispielsweise gebrannte Ziegel, aber vor allem Holz und Holzwerkstoffe, denkbar. Die Verwendung von Holz würde einen weiteren, wesentlichen Schritt in Richtung Ressourcenschonung bedeuten. Zudem hätte Holz deutliche Vorteile in der Herstellung, so z. B. eine einfache Bearbeitbarkeit und hohe Bruchfestigkeit. Im Vergleich mit Betonleisten ist allerdings von einer geringeren Dauerhaftigkeit auszugehen¹³, sodass die Möglichkeit eines planmäßigen Austauschs mit zu bedenken wäre.

Ein weiteres, zu behandelndes Thema ist das Eingehen auf Bauteilränder (Sockel, Dachränder, Gebäudeecken, Öffnungen, etc.) und weitere Sonderstellen, welche in der Arbeit nur rudimentär behandelt werden.

Ferner könnte untersucht werden, ob die hier besprochenen Strategien und Techniken auch auf weitere Lehmbauweisen, wie etwa den Lehmstein- oder Wellerbau (vgl. S. 38), sinnvoll anwendbar sind. Einige bereits realisierte Beispiele werden in Kap. 3 (vgl. S. 84) erwähnt.

Mauerwerksbauweise

Auch bezüglich der Stampflehm-Mauerwerksbauweise im Allgemeinen – welche in der Arbeit lediglich angedacht wird – entstanden diverse Fragen, welche für deren Weiterentwicklung wesentlich erscheinen. Hier bleiben vor allem verschiedene konstruktive Themen, wie etwa die Fügetechnik, Fugenstärken, oder notwendige Toleranzmaße betreffend, näher zu untersuchen.

Auch lassen die bisherigen Untersuchungen vermuten, dass die Entwicklung speziell auf Stampflehm-Mauerwerkssteine, und hier auf verschiedene Steingrößen, abgestimmter und optimierter Körnungslinien angebracht ist. Dies gilt umso mehr, je kleinformatiger der Lehmstein, das heißt je höher dessen Kantenanteil ist, da die Größe und der Anteil des Grobkorns in der Mischung ein wichtiger Einflußparameter der Kantenstabilität ist. Wie sich in den Untersuchungen andeutete, ist ein hinreichender Kantenschutz mittels Erosionsleisten allein kaum herstellbar.

Weitere materialtechnische Fragen betreffen z. B. die optimale Zusammensetzung von Lehm- und Kalkmauermörteln.

Über den Lehmbau hinaus

Schließlich bietet die Arbeit auch über den Lehmbau hinaus Anregungen. Ein Thema betrifft dabei den Umgang mit Elementfugen. Im zeitgenössischen, elementierten Bauen werden Fugen häufig kaschiert, wodurch die Bauweise verborgen bleibt und eine gestalterische Auseinandersetzung mit dieser vermieden wird. Durch eine tiefere Beschäftigung mit der Fügethematik können bei elementierten Bauweisen jedoch – wie etwa im Werk von Architekten wie Angelo Mangiarotti oder Fritz Haller – spezifische architektonische Ausdrucksformen entstehen. Die in der Arbeit gezeigten Arten der Behandlung der Mauerwerksfugen könnten daher als Inspiration für den Umgang mit Elementfugen auch bei anderen Materialien und Bauweisen dienen.

Vor allem aber werden Anstöße für einen veränderten Umgang mit der Alterung von Baustoffen gegeben. Wie eingangs erläutert, ist eine stärkere Beschäftigung mit dem Alterungsprozess von Gebäuden notwendig, um die negativen Auswirkungen des Bausektors auf die Umwelt zu reduzieren. Viele moderne Gebäudehüllen weisen relativ geringe Haltbarkeiten auf, da sie über keine Strategien des Umgangs mit Alterung verfügen. Otto Kapfinger etwa sieht ein großes Problem in „[...] Architektur, die mit hohem Energieaufwand und komplexen Transformationen natürlicher Stoffe dem Vorbild maschineller und hochtechnologischer Produkt-Sphären nacheifert, und die in ihrer behaupteten Pflegeleichtigkeit, äußerlichen Brillanz und ihrem patinophoben Glamour eben nicht altern kann, sondern nur veralten“¹⁴.

Aber nicht nur das Material an sich, sondern auch die Art, in der wir dieses verwenden, kann dem Ziel einer ansprechenden Alterung im Wege stehen. Der Kulturwissenschaftler Bernhard Tschofen schreibt: „Wir schätzen die Nachhaltigkeit, die nachwachsenden Rohstoffen nachgesagt wird, verwechseln Nachhaltigkeit aber mit Unvergänglichkeit (und behandeln dafür den Rohstoff dermaßen, dass von nachhaltigem Umgang nicht mehr die Rede sein kann).“¹⁵

Der in der Arbeit untersuchte Umgang mit Alterung beim „Low-Tech“-Baustoff Lehm weist hier einen alternativen Weg. Was

13 vgl. Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., 2008

14 Kapfinger 2015, S. 12

15 Tschofen 2001, S. 6

konkrete Übertragungen angeht, so könnte beispielsweise bei anderen mineralischen Baustoffen wie Ziegeln oder Kalk-/Zementputzen untersucht werden, ob – und wenn ja, wie – geringere Oberflächenhärten und -versiegelungen herstellbar sind. Im Zuge niedrigerer Brenntemperaturen bzw. geringerer Zementgehalte ließen sich beachtliche Mengen an CO₂ einsparen, und eine bewusst in Kauf genommene, stärkere Erosion könnte sich, ähnlich wie bei Stampflehm, in einer qualitätsvolleren Alterung niederschlagen.^{16,17}

Aufbauend hierauf wäre schließlich auch die Anwendung des Konzepts der Steuerung der Erosion – also der Eingriff in den Alterungsprozess durch Hilfsmittel ähnlich der Erosionsleiste – zu untersuchen. Auch für den Holzbau erscheint die Steuerung der Erosion interessant. Mittels ihrer ließen sich etwa bei unbehandelten Holzfassaden die Möglichkeiten der Kontrolle über den natürlichen Prozess, und damit der ästhetischen Thematisierung der Verwitterung, deutlich erweitern.

16 Grenzen sind dabei durch Materialien gegeben, bei denen umweltschädliche Auswaschungen (wie z. B. bei oxidierendem Kupfer, oder bei mit Bioziden versetzten Fassadenbeschichtungen) zu erwarten sind, also ein ökologischer Preis in anderen Bereichen zu zahlen wäre.

17 Im Zusammenwirken mit geringeren Oberflächenfestigkeiten könnten auch Strategien der Förderung natürlicher Patinabildung untersucht werden, welche bei vielen Materialien mit einer positiv bewerteten Alterung in Zusammenhang steht.

A Literaturverzeichnis

ANGER, R. (2019) – „Wie Lehmarchitektur zum gesellschaftlichen Wandel beiträgt“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmarchitektur. Von den Anfängen bis heute*, München, S. 22 f.

ANGER, R.; FONTAINE, L. (2018) – „Im Gleichgewicht mit der Atmosphäre“, in: *Du 887, Okt./Nov. 2018, Lehmarchitektur heute*, Zürich, S. 74-77

ABU-GHAZZEH, T. M. (2001) – “The art of architectural decoration in the traditional houses of Al-Alkhalaf, Saudi Arabia”, in: *Journal of Architectural and Planning Research*, vol. 18, no. 2, Chicago, S. 156–177, abrufbar unter: www.jstor.org/stable/43030571, abgerufen: 30. Januar 2021

BOLTSHAUSER, R. (Hg.) (2019) – *Pisé: Stampflehm, Tradition und Potenzial*, Zürich

BUI, Q.B. (2008) – *Stabilité des structures en Pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques*, Dissertation am Institut National des Sciences appliquées de Lyon.

BUI, Q.B.; MOREL, J.C.; VENKATARAMA REDDY, B.V.; GHAYAD, W. (2009) – „Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering“, in: *Building and Environment, Volume 44, Issue 5, 2009*, abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.001>, abgerufen: 30. Januar 2021

BUND DEUTSCHER ARCHITEKTEN BDA (Hg.) (2019) – *Das Haus der Erde. Positionen für eine klimagerechte Architektur in Stadt und Land*, 2. Auflage, Berlin, abrufbar unter: https://www.bda-bund.de/wp-content/uploads/2019/04/20190819_DasHausDerErde_Monitor.pdf, abgerufen: 30. Januar 2021

PONTE, M. M. C. C. (2012) – *Arquitetura de Terra: O desenho para a durabilidade das construções*, Masterthesis an der Universität Coimbra, Portugal, abrufbar unter: <http://hdl.handle.net/10316/23293>, abgerufen: 30. Januar 2021

COINTEREAUX, F., (1803) *Der Lehmarchitektur - Pisé-Baukunst*, 3. Reprintauflage der Originalausgabe von 1803 nach dem Exemplar des Verlagsarchivs, Leipzig 2002

CRATERRE (2004), *Tour autour de la terre: Catalogue de l'exposition*,

Grenoble

CROZIER, C. (1986) – *Soil conservation techniques for hillside farms*, Washington, DC, abrufbar unter: <https://files.eric.ed.gov/full-text/ED288044.pdf>, abgerufen: 30. Januar 2021

DACHVERBAND LEHM E.V. (2009) (Hg.) – *Lehmbau Regeln - Begriffe, Baustoffe, Bauteile*, 3., überarbeitete Auflage, Wiesbaden

DAHMEN, A.J. (2015) – „Who's afraid of raw earth? Experimental wall in New England and the environmental cost of stabilization“, in: Ciancio & Beckett (Hg.): *Rammed Earth Construction*, London

DAHMEN, A.J.; MUÑOZ, F.J.F. (2015) – „Modular rammed earth masonry block“, in: Ciancio & Beckett (Hg.): *Rammed Earth Construction*, London

DESVIGNE, M. (o. D. –1) – „Jardins Élémentaires. Villa Medici 1986-1989 - Distinction nature / artifice“, abrufbar unter: <http://micheldesvignepaysagiste.com/fr/jardins-elementaires-3>, abgerufen: 30. Januar 2021

DESVIGNE, M. (o. D. –2) – „Jardins Flottants. ENSP 1984 - Invention de formes de paysage produites par des mécanismes naturels transposés“, abrufbar unter: <http://micheldesvignepaysagiste.com/fr/jardins-flottants>, abgerufen: 30. Januar 2021

DETHIER, J. (1982) – *Lehmarchitektur. Die Zukunft einer vergessenen Bautradition*, München

DETHIER, J., (1983) – *Down to Earth - Adobe Architecture: an old idea, a new future*, New York

DETHIER, J. (2019) – „Plädoyer für den Lehmbau. Ein ökologisches Baumaterial für eine neue Wahrnehmung unserer gebauten Umwelt“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmbaukultur. Von den Anfängen bis heute*, München, S. 8 ff.

DEUTSCHE BAUZEITSCHRIFT DBZ (2019) – „Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm“, Ausgabe 07/08-2019, Gütersloh

DEUTSCHE BAUZEITUNG DB (2014) – *Aus dem Boden gewachsen. Produktions- und Lagergebäude in Laufen (CH)*, DB 11.2014, S. 30-

36, Leinfeld-Echterdingen

DIN (2001) – *DIN EN 12056-3:2000, Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung*, Berlin

DIN (2008) – *DIN 1986-100:2008-05, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056*, Berlin

DIN (2009) – *DIN EN ISO 15927-3, Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 3: Berechnung des Schlagregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten*, Berlin

DIN (2012) – *DIN 68800-2, Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*, Berlin

DIN (2018-1) – *DIN 4108-3, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*, Berlin

DIN (2018-2) – *DIN 18945:2018-12, Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*, Berlin

DIN (2018-3) – *DIN 18946:2018-12, Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*, Berlin

EASTON, D. (1996) – *The Rammed Earth House: Rediscovering the Most Ancient Building Material*, White River Junction

EIRES, R., CAMÕES, A., PONTE, M. (2014) – „Strategies to improve earth building durability“, in: *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development. Proceedings of CIAV 2013*, London

EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR EEA (2017) – *Key findings - Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*, abrufbar unter: <https://www.eea.europa.eu/highlights/climate-change-poses-increasingly-severe/brochure-climate-change-impacts-and>, abgerufen: 30. Januar 2021

FISCHER, D.; SCHINDEL, H. (2019) – „Erosion und Schönheit“, in: *TEC21 20/2019*, Zürich, S. 22-29

FISSABRE, A; WILSON, A. (2012) – „*Lehmpropaganda* – Gegensätzliche Ideologien über Nachhaltigkeit in der Literatur über den Lehm“, in: Dachverband Lehm e. V. (Hg.): *Tagungsband zur 6. internationalen Fachtagung für Lehm: LEHM 2012*, Weimar

FONTAINE, L., ANGER, R. (2009) – *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*, Éditions Belin / Cité des sciences et de l'industrie

FONTAINE, L., ANGER, R., HOUBEN, H., DOAT, P., VAN DAMME, H., OLAGNON, C., JORAND, Y. (2008) – „Von stabilisiertem Lehm zu nanostrukturierten Zusammensetzungen aus Ton-Biopolymeren“, in: Dachverband Lehm e. V. (Hg.): *LEHM 2008, Tagungsbeiträge der 5. internationalen Fachtagung für Lehm*, Weimar

GASNIER, H. (2019) – „Lehm im städtischen Umfeld. Eine neue, zukunftssträchtige Kreislaufwirtschaft“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmbaukultur. Von den Anfängen bis heute*, München, S. 478 f.

GIL-CRESPO, I. J., MALDONADO-RAMOS, L. (2015) – „Hacia una taxonomía constructiva de las tapias de tierra y fábricas encofradas históricas“, in: *Informes de la Construcción, Vol. 67, 538, e086*, abrufbar unter: doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.009>, abgerufen: 30. Januar 2021

GUIBAUD, C. (2005) – „L'architecture en pisé dans le canton de Boën (Loire)“, in: *In Situ 6 - 2005*, abrufbar unter: <https://doi.org/10.4000/insitu.8307>, abgerufen: 30. Januar 2021

GUILLAUD, H. (2019) – „Überblick der Bautechniken im Lehm“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmbaukultur. Von den Anfängen bis heute*, München, S. 30 ff.

GÜNTZEL, J. G. (1988) – *Zur Geschichte des Lehmbaus in Deutschland*, Dissertation am Fachbereich Architektur der Gesamthochschule Kassel, Ökobuch Verlag, Staufen

HALL, M.R.; SWANEY, W (2012) – „European Modern Earth Construction“, in: Hall et. al (Hg.): *Modern Earth Buildings*, Cambridge

HAUPTVERBAND DER GEWERBLICHEN BERUFGENOSSEN-

SCHAFTEN, FACHAUSSCHUSS "BAU" (1992) – "BGI 695: Merkblatt für das Handhaben von Mauersteinen", abrufbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/45>, abgerufen: 30. Januar 2021

HEATHCOTE, K. A. (2002) – *An Investigation into the Erodibility of Earth Wall Units*, Dissertation an der University of Technology Sydney, abrufbar unter: <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/20153/2020/02Whole.pdf>, abgerufen: 30. Januar 2021

HERINGER (2019) – „Lehmbauarchitektur erleichtert das Leben“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmbaukultur. Von den Anfängen bis heute*, München 2019, S. 483

HERINGER, A.; HOWE, L.; RAUCH, M. (2019) – *Upscaling Earth*. Zürich, Schweiz

HOPPE, P.; SCHNEIDER, H. (2016) – „Gewellte Stampflehm-Oberflächen“, in: Dachverband Lehm e. V. (Hg.): *Tagungsband zur 7. internationalen Fachtagung für Lehm: LEHM 2016*. Weimar, Deutschland

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. (1994) – *Earth Construction. A comprehensive guide*, Bourton-on-Dunsmore, England

INSTITUT FÜR ERHALTUNG UND MODERNISIERUNG VON BAUWERKEN E.V. (2008) – *Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus für den Leitfaden 'Nachhaltiges Bauen'*, TU Berlin, abrufbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/forschungsprojekte/Nutzungsdauern_IEMB-Studie_2008.pdf, abgerufen: 30. Januar 2021

INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR IEA (o. D.) – „Data and Statistics“, abrufbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource>, abgerufen: 15. April 2020

JÄGER, W.; HARTMANN, R. (2019) – *Lehmmauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, abrufbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/>

rswb/19119019104.pdf, abgerufen: 30. Januar 2021

JANSON, C. (2013) – *Materialforschung Stampflehm. Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm*, Dissertation an der Fakultät VI der TU Berlin, Deutschland

JACQUIN, P. (2008) – *Analysis of Historic Rammed Earth Construction*, Durham University, abrufbar unter: <http://etheses.dur.ac.uk/2169/>, abgerufen: 30.01.2021

KAPFINGER, O. (2010) – „Bauen an der Erde“, in: Kapfinger, Simon: *Haus Rauch: Ein Modell moderner Lehmarchitektur*, Basel

KAPFINGER, O.; SAUER, M. (Hg.) (2015) – *Martin Rauch: Gebaute Erde. Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm*, München, Deutschland

KAPFINGER, O.; SIMON, A. (Hg.) (2010) – *Haus Rauch: Ein Modell moderner Lehmarchitektur*, Basel, Schweiz

KAUFMANN, H. (2001) – „Hineinverwittern in die Landschaft“, in: *Zuschnitt 4, proHolz Austria*, Wien

KÜNZEL, H.M. (1994) – *IBP-Mitteilung 263, Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen*, Fraunhofer Institut für Bauphysik, abrufbar unter: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/1-400/201-300/263_IBPmitteilung.pdf, abgerufen: 30. Januar 2021

LANDROU, G.; BRUMAUD, C.; HABERT, G. (2019) – „Zu den Potenzialen von Flüssiglehm in der zeitgenössischen Bauproduktion“, in: Boltshauser, R. (Hg.): *Pisé: Stampflehm, Tradition und Potenzial*. Zürich, Schweiz

LAWRENCE, M.; HEATH, A.; WALKER, P. (2008) – „Mörtel für dünne Wände aus ungebrannten Lehmsteinen“, in: Dachverband Lehm e. V. (Hg.): *Tagungsband zur 5. internationalen Fachtagung für Lehm bau: LEHM 2008*, Weimar, Deutschland

MACK, G. (2005) – *Herzog & de Meuron 1992-1996*, Basel

MALDONADO-RAMOS, L.; CASTILLA-PASCUAL, F. J.; VELA-COSSIO, F. (1997) – „La técnica del tapial en la Comunidad Autónoma

de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia“, in: *Informes de la Construcción, Vol 49, No 452*

MANIATIDIS, V.; WALKER, P. (2003) – *A Review of Rammed Earth Construction*. University of Bath, England, abrufbar unter: <https://people.bath.ac.uk/abspw/rammedearth/review.pdf>, abgerufen: 30. Januar 2021

MENOLFI, E. (2019) – „Der Pisébau in der Deutschschweiz“, in: Boltshauser, R. (Hg.): *Pisé: Stampflehm, Tradition und Potenzial*, Zürich, S. 100-151

MILETO, C. (Hauptautorin) / UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (2011) – *restAPIA*, abrufbar unter: <http://www.restapia.es/pages/proyecto>, <http://www.restapia.es/59515/la-tapia>, abgerufen: 30. Januar 2021

MILETO, C.; VEGAS, F.; FEJZO, E.; KUENTZ, E.; RABAUD, J.; RIPOCHE, T.; WALLERS, E. (2014) – *tieRAH, Estudio de la tapia en Restauración de Arquitectura Histórica no monumental*, Universidad Politècnica de Valencia – *Técnicas en la península Iberica*, abrufbar unter: <https://tierrah.wordpress.com/category/tecnicas/>, abgerufen: 30. Januar 2021

MINKE, G. (1986) – *Bauen mit Lehm. Aktuelle Berichte auch Praxis und Forschung, Heft 5, Lehmsteinbau*. Freiburg, Deutschland

MINKE, G. (2001) – *Das neue Lehm bau-Handbuch*, 5. Auflage, Stautfen, Deutschland

MINKE, G. (2006) – *Building With Earth*, Basel, Schweiz

MOEWES, G. (1995) – *Weder Hütten noch Paläste. Architektur und Ökologie in der Arbeitsgesellschaft. Eine Streitschrift*, Basel, Schweiz

NYAMEKYE, C.; THIEL, M.; SCHÖNBRODT-STITT, S.; ZOUNGRANA, B. J.-B.; AMEKUDZI, L. K. (2018) – „Soil and Water Conservation in Burkina Faso, West Africa“, in: *Sustainability 2018, 10, MDPI*, abrufbar unter: <https://doi.org/10.3390/su10093182>, abgerufen: 30. Januar 2021

ÖKOBAUDAT - INFORMATIONSPORTAL NACHHALTIGES BAUEN

(o. D.) – „Browser Ökobaudat - Datenbank“, abrufbar unter: <https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat/daten/db1/1/Mineralische%20Baustoffe.html#bereich1>, abgerufen: 30.01.2021

PACHECO TORRAL, F.; M. G. EIRENS, R.; JALALI, S. (2009) – *Const-rução em Terra*, Guimarães, Portugal

PARTEY, S. T., ZOUZMORE, R. B., OUEDRAOGO, M., CAMPBELL, B. M. (2018) – „Developing climate-smart agriculture to face climate variability in West Africa: Challenges and lessons learnt“, in: *Journal of Cleaner Production*, 03-2018, abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.199>, abgerufen: 30. Januar 2021

PIGNAL, B. (2005) – *Terre crue. Techniques de construction et de restauration*, Paris, Frankreich

PRESS, F. (1995) – *Allgemeine Geologie: eine Einführung*, Heidelberg, Deutschland

PROMINSKI, M.; STOKMAN, A.; ZELLER, S.; STIMBERG, D.; VOERMANEK, H. (2012) – *Fluss. Raum. Entwerfen. Planungsstrategien für urbane Fließgewässer*. Basel, Schweiz

RAEL, R. (2009) – *Earth Architecture*, New York, USA

RAUCH, M. (o. D.) – *Moderner Massivlehmbau* (Abrufbar unter: http://www.moderner-lehmbau.com/deutsch/editorial/lr_d27.htm)

RAUCH, M. (2003) – „Konstruieren mit Stampflehm“, in: *Detail 6/2003*. München, Deutschland

RAUCH, M. (2010) – „Konstruktion“, in: Kapfinger, Simon: *Haus Rauch: Ein Modell moderner Lehmarhitektur*. Basel, Schweiz

RAUCH, M. (2011) – „Moderner Lehmbau. Eine Bauweise mit Entwicklungspotenzial“, in: *Detail 6/2011*. München, Deutschland

RICHTER, D. (1980) – *Allgemeine Geologie*. Berlin, Deutschland

RÖHLEN, U.; ZIEGERT, C. (2014) – *Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung*, 2. Auflage, Berlin, Deutschland

RUŽICKA, J.; HAVLÍK, F. (2012) – „Verbesserte, vorgefertigte Bauele-

mente aus Stampflehm für vertikale und horizontale Tragwerkteile“, in: Dachverband Lehm e. V. (Hg.): *Tagungsband zur internationalen Fachtagung für Lehmbau LEHM 2012*, Weimar, Deutschland

SALIS, G. (2019) – „Stampflehmgewölbe aus vorgefertigten Elementen“, in: Boltshauser, R. (Hg.): *Pisé: Stampflehm, Tradition und Potenzial*, Zürich, Schweiz, S. 212-216

SCHRÖDER, H. (2019) – *Lehmbau. Mit Lehm ökologisch planen und bauen* (3., aktualisierte Auflage), Wiesbaden, Deutschland

SIMON, A. (2010) – „Bauen am Raum“, in: Kapfinger, Simon (Hg.): *Haus Rauch: Ein Modell moderner Lehmarhitektur*, Basel, Schweiz, S. 24-35

SIMON, A. (2018) – „Zukünftige Ziegel“, in: *Lehmliebe*, Hochparterre Themenheft

SPEIDEL, M. (1985) – „Vom Armeleutehaus zur Kaiservilla. Der Baustoff Lehm zwischen West und Ost“, in: *Arch+ 80: Lust auf Lehm*, Aachen, S. 56-59.

STACHER, S. (2018) – „Paris kommt auf die Erde. Planung eines Wohnensembles für Ivry und einer Fabrik für Lehmprodukte in Sevran von Joly & Loiret mit Wang Shu“, in: *werk, bauen+wohnen*, 06/2018

STATISTISCHES BUNDESAMT (2019) – *Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen)*, abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen: 15. April 2020

THOMSON, A. (2007) – *The durability of rammed earth*. Masterarbeit an der University of Bath, England (nicht publiziert)

THOMSON, A.; POPE, D.; WALKER, P. (2008) – „Erosion characteristics of rammed earth“, in: *Kerpic08 - Learning from earthen architecture in climate change*. Cyprus International University, Lefkosa, Zypern

TSCHOFEN, B. (2001) – „Über Totenbretter und andere Listen

gegen die Vergänglichkeit“, in: *Zuschnitt 4. proHolz Austria*, Wien, Österreich

VANDERMEEREN, O. (2016) – *Réinventer la poterie au Niger pour limiter l'entretien de façade en terre*. Beitrag zum internationalen Lehmalkongress Terra 2016, Lyon, Frankreich, abrufbar unter: <https://craterre.hypotheses.org/1200>, abgerufen: 30. Januar 2021

VAN DER POEL, C. (2017) – „Baustoff ab Baustelle“, in: *TEC21 9–10/2017*, Zürich, S. 30 f.

WACHSMANN, K. (1962) – *Wendepunkt im Bauen*. Reinbek b. Hamburg, Deutschland

WALKER, P.; KEABLE, R.; MARTON, J.; MANIATIDIS, V. (2005) – *Rammed Earth: Design and Construction Guidelines*

WEIDINGER, H. (2003) – *Patina: Neue Ästhetik in der zeitgenössischen Architektur*. München, Deutschland

WILSON, A. (2019) – „Bilanz einer 50-jährigen Entwicklung. 1970-2020“, in: Dethier, J. (Hg.): *Lehmalkultur. Von den Anfängen bis heute*. München, S. 358 ff.

WITRY, M.; GUILLAUD, H. (2019) – „Der Pisébau in der Region Rhone-Alpen“, in: Boltshauser, R. (Hg.): *Pisé: Stampflehm, Tradition und Potenzial*, Zürich, S. 18-81

B Abbildungsnachweis

- Abb. 1-1: Pixabay, <https://pixabay.com/de/photos/industrie-rauch-qualm-schornstein-80939/>, Lizenz: Pixabay Lizenz, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 1-3: Kapfinger, Sauer 2015, S. 71
- Abb. 1-4: Wikimedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KMM_Merz_01.JPG: „sculpture Igloo di pietra (1982) by Mario Merz in KMM sculpturepark/The Netherlands“ von Gerardus (<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Gerardus>), Lizenz: Public Domain, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 1-5: Dick Schmitt, „The Chinati Foundation/La Fundacion Chinati, Marfa, Texas“, <http://www.fmschmitt.com/travels/texas/big-bend-area/chinati/index.html>, Lizenz: CC BY-NC-ND 2.5 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/deed.de>), abgerufen: 20. August 2022
- Abb. 1-7: Fontaine, Anger 2009, S. 12
- Abb. 1-8: © Johanna Agerman Ross / Disegno
- Abb. 2-1: Jäger 2019, S. 1
- Abb. 2-2: Minke 2006, S. 61
- Abb. 2-3: Van der Poel 2017, S. 31
- Abb. 3-1: Wikimedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grenade_Albaicin_Mirador_san_Nicolas.JPG: „View of part of the Alhambra (Alcazaba, the fortress), taken from Albaicin, Granada, Spain“ von Jubulon (<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Jebulon>), Lizenz: CC BY-SA 1.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/deed.de>), abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-2: Boltshauser 2019, S. 32
- Abb. 3-3: Schröder 2019, S. 20
- Abb. 3-4: Flickr, <https://www.flickr.com/photos/18637958@N08/3544050074/>: „Stripes 3“ von Matas Petrikas (<https://www.flickr.com/photos/18637958@N08/>), Lizenz: CC BY-NC 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/deed.de>), abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-5: Rauch 2011, S. 755
- Abb. 3-6: Deutsche Bauzeitung 2014, S. 30
- Abb. 3-7: Fontaine, Anger 2009, S. 102
- Abb. 3-8: Cointeraux 1802 (2002), erster Teil, Tafel 10
- Abb. 3-9: Kapfinger, Sauer 2015, S. 118 f.
- Abb. 3-10: Kapfinger, Sauer 2015, S. 142 f.

- Abb. 3-11: Deutsche Bauzeitung 2014, S. 35
- Abb. 3-12: Cointeraux 1802 (2002), zweiter Teil, Tafel 1 und Tafel 2
- Abb. 3-13: Güntzel 1988, S. 238
- Abb. 3-14: Le pisé / Nicolas Meunier, „Sorbiers (Loire) Pisé porteur“, <http://www.construction-pise.fr/Sorbiers-Loire>, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-15: House of Arts, Ceské Budejovice / Jan Mahr, „Martin Rauch – Refined Earth“, <https://dumumenicb.cz/en/vystava/martin-rauch-architecture-en/>, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-18: BFT 8/2014, BFT International, abrufbar unter: https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Grossformatpresse_fuer_Leichtbetonsteine_2051199.html, abgerufen: 20. August 2022
- Abb. 3-20: © Probst GmbH
- Abb. 3-21: Pixabay, <https://pixabay.com/de/photos/zentralasien-kirgistan-berg-erosion-487145/>, Lizenz: Pixabay Lizenz, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-22: DIN 2018-1, S. 30
- Abb. 3-23: DIN 2009, S. 14
- Abb. 3-24: Künzel 1994, S. 2
- Abb. 3-29: Minke 2001, S. 203
- Abb. 3-30: Heathcote 2002, S. 136
- Abb. 3-31: Bui et al. 2009, S. 916
- Abb. 3-32: Houben, Guillaud 1994, S. 147
- Abb. 3-33: Kapfinger, Simon 2015, S. 70
- Abb. 3-34: Boltshauser 2019, S. 47
- Abb. 3-35: Kapfinger, Simon 2015, S. 73
- Abb. 3-36: Boltshauser 2019, S. 55
- Abb. 3-37: Boltshauser 2019, S. 30
- Abb. 3-38: Mileto et al. 2014
- Abb. 3-39: Jaquin 2008, S. 221
- Abb. 3-40: Mileto et al. 2014
- Abb. 3-41: Mileto 2011
- Abb. 3-42: Houben, Guillaud 1994, S. 334
- Abb. 3-43: Ziegert, Röhlen 2014, S. 221
- Abb. 3-44: Abu-Ghazzeah 2001, S. 166
- Abb. 3-45: Dethier 1983, S. 8
- Abb. 3-46: Ministry of Culture of Taiwan (Republic of China), <https://mocfile.moc.gov.tw/files/201712/ac92ac98-95ec-40e6-bf52-c6e08de64266.pdf>, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-47: Wikimedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cam0492_Habitation_de_Pouss.jpg: „Habitation mous-
goum de Pouss dans l'extrême nord ; l'entrée“ von Colibryus (Bruno Trédez), Lizenz: CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>), abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-48: Vandermeeren 2016
- Abb. 3-49: © Lehrstuhl für Gebäudelehre, RWTH Aachen / Ivo Mayr
- Abb. 3-50: Gasnier 2019, S. 479
- Abb. 3-51: Flickr, https://www.flickr.com/photos/_freelance/6880568794/in/photostream/: „Gugalun House (Haus Truog Gugalun). Versam, Switzerland. Peter Zumthor, 1994“ von fcamusd (https://www.flickr.com/photos/_freelance/), Lizenz: CC BY 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.de>), abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-52: © Dieter Uhlig
- Abb. 3-53: European Geoscience Union (EGU) / Freddy Rey, „The stepping willow walls placed in the gully“, <https://blogs.egu.eu/geolog/2013/04/11/bioengineering-could-be-the-answer-to-dirt-free-dams/>, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-54: Flickr, <https://www.flickr.com/photos/oxfam/8329004375/>: „Cash-for-work and disaster risk reduction in Niger“ von Fatoumata Diabate/Oxfam, Lizenz: CC BY-NC-ND 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/deed.de>), abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-55: David Reed Landscape Architects, „Erosion Control at Steamplant Road – Naval Subbase, San Diego, Californiar“, <http://www.drsla.com/2008/07/erosion-control-at-steamplant-road-naval-subbase-san-diego-california/>, abgerufen: 30. Januar 2021
- Abb. 3-56: Ecomondo, „Canalette trasversali in legno per la raccolta e lo sgrondo delle acque nelle strade bianche e sterrate“, <https://myecomondo.blogspot.com/2014/09/canalette-trasversali-in-legno-per-la.html>, Lizenz: CC BY-NC-ND 2.5 IT (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/it/>), abgerufen: 20 August 2022
- Abb. 3-57: Crozier 1986, S. 35
- Abb. 3-58: © Franziska Kaguembèga-Müller
- Abb. 5-114: Mack 2005, S. 152
- Abb. 5-115: © mahemot, Martina Hering-Motaleb

Abb. 6-3: © Marktgemeinde Mittenwald
Abb. 6-4: © MDP, Michel Desvigne Paysagiste (Michel Desvigne)
Abb. 6-5: Prominski et al. 2012, S. 264

Alle weiteren Abbildungen vom Autor erstellt.

