

Detleff Schermer, Eric Brehm (Hrsg.)

# Mauerwerk-Kalender 2025

## Schwerpunkte: Aspekte der Nachhaltigkeit

### ■ **klimaeffizientes und nachhaltiges Bauen mit Mauerwerk**

- praktische Lösungen der Umsetzung nachhaltiger Projekte unter Einsatz von Mauerwerk
- Stand der Technik für zweischaliges Verblendmauerwerk

Das Nachschlagewerk zum Mauerwerksbau behandelt in seinem 50. Jahrgang verschiedene Aspekte des Nachhaltigen Bauens mit Mauerwerk. Verschiedene Methoden zur Erreichung von nachhaltigen Gebäuden, auch im Entwurf, werden vorgestellt.



vorl. Abb.

2 / 2025 · ca. 414 Seiten ·  
ca. 316 Abbildungen · ca. 137 Tabellen

Hardcover

**ISBN 978-3-433-03445-3**

ca. € 159\*

Fortsetzungspreis

ca. € 139\*

**Bereits vorbestellbar.**

### **BESTELLEN**

+49 (0)30 470 31-236  
marketing@ernst-und-sohn.de  
[www.ernst-und-sohn.de/3445](http://www.ernst-und-sohn.de/3445)

2025

# MAUERWERK KALENDER

Aspekte der Nachhaltigkeit

Herausgegeben von  
Detleff Schermer, Regensburg  
Eric Brehm, Karlsruhe

50. Jahrgang

---

## Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,  
wir freuen uns sehr, Ihnen die neueste Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders vorlegen zu dürfen, die sich mit dem Schwerpunkt des nachhaltigen Bauens auseinandersetzt. Bei dieser Ausgabe handelt es sich um die mittlerweile 50. – wir sind glücklich, ein so lange bestehendes Standardwerk in die Zukunft führen zu dürfen. Der Mauerwerk-Kalender ist das etablierte Nachschlage- und Referenzwerk für alle die erfolgreiche Bauweise Mauerwerk betreffenden Themen.

Diese besondere Ausgabe widmet sich im Schwerpunkt dem nachhaltigen Bauen. Auch wenn dieses Thema natürlich schon prominent vertreten war, so rechtfertigt dessen enorme Bedeutung eine erneute Ausgabe mit diesem Fokus. Nachhaltigkeit wird als wichtigstes Thema der Gegenwart auch in den zukünftigen Ausgaben ein Hauptthema bleiben.

In der vorliegenden Ausgabe wird gezielt auf praktische Lösungen und Beispiele der Umsetzung nachhaltiger Projekte unter Einsatz von Mauerwerk eingegangen. Der Beitrag von *Nisse, Maucher und Grimm* erläutert anschaulich die enormen Potenziale des Massivbaus hinsichtlich der Nachhaltigkeit.

Im Beitrag von *Wigger et al.* wird gezeigt, wie Stampflehmwände erfolgreich eingesetzt wurden, um die Klimaeffizienz zu verbessern. Der Beitrag von *Nagler* greift die unterschiedlichen Entwurfsansätze seiner sehr bekannten Forschungshäuser in Bad Aibling auf und erläutert die bisher erreichten Resultate. Weitere Beiträge von *Göttig et al.*, *Istanbuli et al.* und *Heller et al.* geben Eindrücke von Innovationen im Mauerwerksbau und deren Stärken hinsichtlich einer nachhaltigen Bauweise.

Dennoch kommen auch klassisch konstruktive Themen in dieser Ausgabe nicht zu kurz. Der Beitrag von *Gigla* stellt den Stand der Technik bei zweiseitigem Verblendmauerwerk dar. Wie die Tragfähigkeit bestehender Eisenbahngewölbebrücken experimentell bestimmt werden kann, erläutert der Beitrag von *Pelka et al.*

Des Weiteren dokumentiert auch dieser Mauerwerk-Kalender als Jahrbuch wieder den aktuellen Stand der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Bauartgenehmigungen sowie laufende Forschungsprojekte. Aktuelle normative Entwicklungen werden zudem anschaulich dargelegt.

Wir sind überzeugt, ein spannendes und interessantes Jahrbuch gestaltet zu haben, das sowohl den Praktikern als auch den mehr forschungsauffinen Leserinnen und Lesern eine spannende Lektüre bietet.

Unser herzlicher Dank gilt allen Mitwirkenden an diesem Band, insbesondere wieder Dr.-Ing. Dirk Jesse von Ernst & Sohn, für die große Unterstützung. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende Lektüre und hoffen, dass die Ausgabe Ihnen neue Impulse für Ihre Herangehensweise an die Lösung der kommenden Fragestellungen liefert. Packen wir's an.

Herzliche Grüße

Darmstadt und München im Juli 2024

Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm

Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** III

**Autor:innenverzeichnis** XV

## A Normen und Baustoffe

### A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 1

Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels

1	Einleitung 3	5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel 8
2	Mauersteine 3	5.1	Allgemeines 8
2.1	Festigkeitseigenschaften 3	5.2	Haftscherfestigkeit 8
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe 3	5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit 9
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite 3	6	Mauerwerk 10
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit 3	6.1	Allgemeines 10
2.2	Verformungseigenschaften 4	6.2	Festigkeitseigenschaften 10
2.2.1	Elastizitätsmoduln 4	6.2.1	Druckfestigkeit 10
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl 4	6.2.2	Längsdruckfestigkeit 11
2.3	Kapillare Wasseraufnahme 5	6.2.3	Zugfestigkeit 11
3	Mauermörtel 6	6.2.4	Biegezugfestigkeit 13
3.1	Festigkeitseigenschaften 6	6.2.5	Schubfestigkeit 14
3.1.1	Druckfestigkeit 6	6.3	Verformungseigenschaften 14
3.1.2	Zugfestigkeit 6	6.3.1	Elastizitätsmoduln 14
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln 6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung 15
4	Mauermörtel im Mauerwerk 6		Literatur 15

### A 2 Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner Bauartgenehmigung 17

Matthias Bauer, Martin Wilfinger

0	Allgemeines 20	2	Mauermörtel und Klebstoffe 26
0.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen 20	3	Mauertafeln 26
0.1.1	Vertikalschlitz 20	4	Mauerwerk aus Mauersteinen mit CE-Kennzeichnung 31
0.1.2	Horizontalschlitz 20	5	Sonstiges Mauerwerk 33
0.2	Weitere allgemeine Bestimmungen und Anforderungen 20		Literatur 38
1	Ergänzungsbauten und Zubehör für Mauerwerk 21		

### A 3 Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau

(Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 04.03.2024) 41

Benjamin Purkert

1	Vorbemerkung 43	Literatur 63
2	Regelwerk 44	

**A 4 Aufbereitung von Musterwänden aus dämmstoffgefüllten Mauerziegeln 65**

Barbara Leydolph, Anette Müller

1	Einführung 67	4	Ergebnisse der Untersuchungen im Labormaßstab 69
2	Untersuchungen im Labormaßstab 67	5	Ergebnisse der Untersuchungen im technischen Maßstab 70
2.1	Materialien 67	6	Schlussfolgerungen 71
2.2	Untersuchungsmethoden 67		Literatur 71
3	Untersuchungen im technischen Maßstab 67		

**A 5 Mineralschaum – Einblick in Forschung und Entwicklung eines neuen Dämmstoffs 73**

Klemens Laub, Attila Höchst, Mirko Landmann, Barbara Leydolph

1	Einleitung 75	3	Auswahl bauphysikalischer Eigenschaften 81
2	Herstellung von Mineralschäumen 75	3.1	Schwinden des Mineralschaums 81
2.1	Herstellungsverfahren 75	3.2	Trocknungsverhalten verfüllter Hochlochziegel 82
2.2	Gesetzliche Regelung und Zulassung 76	3.3	Nass- und Trockenrohdichte, Wärmeleitfähigkeit 83
2.3	Herausforderungen und Möglichkeiten 76	3.4	Massenhydrophobierter Mineralschaum 84
2.4	Forschungs- und Entwicklungsgegenstand am IAB 78	3.4.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 85
2.5	Erstarrungsverhalten von Mineralschaum 80	3.4.2	Wasseraufnahme von Hochlochziegeln nach DIN EN 772-11:2011 86
2.6	Qualitätssicherung in der Produktion 80	3.4.3	Kapillares Wasseraugen von Hochlochziegeln 86
2.6.1	Ausgangsstoffe 80	4	Zusammenfassung 87
2.6.2	Monitoring des Herstellungsverfahrens 80		Literatur 88

**A 6 Bauaufsichtliche Regelungen im Mauerwerksbau 89**

Richard Zander

1	Einleitung 91	3	Weg eines Bauprodukts bis zur Verwendbarkeit 95
2	Regelungen für Bauprodukte und Bauarten im Überblick 91	3.1	Harmonisierte Norm – ja oder nein 95
2.1	Bauprodukt/Bauart 91	3.2	Europäisch oder national 95
2.2	Harmonisierte Norm (hEN) 91	3.3	Verwendbarkeit in Deutschland 95
2.3	Eurocodes 92	3.4	Anwendungsregel 95
2.4	Europäisches Bewertungsdokument (EAD) und Europäische Technische Bewertung (ETA) 92	3.5	Einordnung des Lehmsteinmauerwerks 97
2.5	Nationale Normen (DIN) 92	4	Neue Baustoffe und Bauprodukte 98
2.6	Verwendung von Bauprodukten und Anwendung von Bauarten 93	5	Zusammenfassung 99
2.7	Vergleich der nationalen und europäischen Regelungen 93		Literatur 99

**B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)****B 1 Von der Handarbeit zur Hochtechnologie im Reallabor: Die Möglichkeit der BIM-basierten Planung und effizienten Produktion von Ziegelwänden durch Roboter 101**  
Stefan Biersack, Marc Schmailzl, Thomas Linner, Friedrich Eder, Mathias Obergriesser

1	Einleitung	103	4.2	Softwareunabhängiger Open-BIM-Ansatz	105
2	Reallabor „Building Lab“	103	4.3	Versuchsaufbau im Reallabor	105
3	Bauindustrie und Baurobotik	103	5	Diskussion	108
4	End-to-End-Workflow	104	6	Fazit und Ausblick	108
4.1	Softwareabhängiger Closed-BIM-Ansatz	104		Literatur	108

**B 2 Nachhaltigkeit im Praxis-Check – Das kann die monolithische Bauweise wirklich! 109**  
Juliane Nisse, Thomas Maucher, Julius Grimm

1	Einleitung	111	4.2	Meilenstein I (Projektinitiierung)	118
2	Anforderungen an moderne, nachhaltige Wohngebäude	111	4.3	Meilenstein II (Planungsphase) – Ausgewählte Ergebnisse	120
2.1	Anforderungen an die Energieeffizienz (EE)	112	4.3.1	Ergebnisse der Energiebilanz	123
2.2	Anforderungen an das Nachhaltige Bauen (NH)	112	4.3.2	Ergebnisse der Ökobilanzierung	125
2.3	Anforderungen für das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)	114	4.3.3	Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung	127
2.4	Anforderungen Förderung (Zusammenfassung)	115	4.3.4	Ergebnisse für die Barrierefreiheit	129
3	NH-Initiative für das Bauen mit Ziegelprodukten	116	4.3.5	Ergebnisse der Tageslichtversorgung und des sommerlichen Wärmeschutzes	129
3.1	Die Idee	116	4.4	Meilenstein III – Ausschreibung	131
3.2	Die Bedeutung des „klimabewusstbauen“-Prinzips	116	4.4.1	Nachweis der Schadstofffreiheit	132
4	Vorstellung des NH-Pilotprojekts	116	4.4.2	Nachweis von nachhaltigem Holz	132
4.1	Meilensteine des Projekts in der Planung	118	4.5	Meilenstein IV – Bauausführung	133
			4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Pilotprojekt	135
			5	Fazit und Ausblick	139
				Literatur	139

**B 3 Stampflehmwände als tragendes Bauteil – am Beispiel des LWL-Freilichtmuseums in Detmold 141**  
Toralf Burkert, Murat Ince, Jens-Uwe Schulz, Simon Waigand, Heinrich Wigger

1	Einführung	143	4	Physikalische und mechanische Untersuchungen von Stampflehm	148
2	Bauwerk und Innovation	143	4.1	Vorgehensweise	148
2.1	Prolog	143	4.2	Herstellung der Probekörper und Feuchteeinfluss	148
2.2	Eingangs- und Ausstellungsgebäude des LWL-Freilichtmuseums Detmold	143	4.3	Trocknungs- und Schwindverhalten unter Laborbedingungen	149
2.3	Stampflehmkonstruktion im LWL-Freilichtmuseum	144	4.4	Untersuchungen zum mechanischen Verhalten	150
2.4	Bauprozess	145	4.4.1	Druckfestigkeit an klein- und großformatigen Prüfkörpern	150
3	Notwendigkeit der Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogene Bauartgenehmigung	146	4.4.2	Zusammenfassung der mechanischen Untersuchungen	155
3.1	Stand der Normung in Deutschland	146	4.4.3	Auswirkungen des Feuchtezustands auf die Druckfestigkeit	155
3.2	Aktuelle Normen des Lehmabaus	147	4.4.4	Kriechverhalten an Zylindern	155

5	Stampflehmwand unter Brandbeanspruchung 157	6.2	Feuchteabhängige Druckfestigkeit 163
5.1	Versuchsaufbau und Belastung 157	6.3	Kriechverformung und Kriechverformungsmodellierung 164
5.2	Durchführung der Brandversuche 158	7	Zusammenfassung 166
5.3	Versuchsergebnisse der Brandprüfungen 159		Literatur 167
6	Bemessung der Stampflehmwand 162		
6.1	Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit und Teilsicherheitsbeiwerte für Stampflehm an kleinformatigen Prüfkörpern 162		

## C Konstruktive Details (Bauphysik)

### C 1 Zweischaliges Verblendmauerwerk 169 Birger Gigla

1	Einführung 171	6	Hinweise zur Ausführung 188
2	Grundsätzliche technische Regeln und Stand der Baupraxis 172	6.1	Mauersteine 188
2.1	Zweischaliges Verblendmauerwerk 172	6.2	Mörtel 189
2.2	Tragende Innenschale 174	6.3	Dehnungsfugen und Lüftungsöffnungen 191
2.3	Verblendschale 174	6.4	Schalenzwischenraum: Abdichtung 191
2.4	Schalenzwischenraum 178	6.5	Schalenzwischenraum: Kerndämmung und Drahtanker 193
3	Dauerhaftigkeit der Verblendschale 180	6.6	Tragschale und Ablangungen 194
4	Energiesparender Wärmeschutz 181	6.7	Reinigung und Beschichtung der Verblendschale 195
5	Eindringen von Feuchte durch Schlagregen 181	6.8	Prozessoptimierungen bei der Herstellung von Verblendmauerwerk 195
		6.9	Nachhaltigkeit 196
		7	Zusammenfassung 198
			Literatur 198

## D Mauerwerk im Bestand

### D 1 Forschungshäuser in Bad Aibling 203 Florian Nagler

1	Vorgeschichte 205	5	Die zweite Serie 214
2	Grundlagen 206	6	Ausblick 217
3	Die erste Serie 209		Literatur 218
4	Kritische Reflexion 212		

### D 2 Planung, Durchführung und Auswertung von Belastungsfahrten auf Eisenbahngewölbebrücken 219 Conrad Pelka, Gregor Stolarski, Thomas Niedermeyer, Gunter Hahn, Christian Hesse, Steffen Marx, Jenny Keßler

1	Einleitung 221	3.2	Untersuchung des Bauwerks 224
2	Entstehungsgeschichte der EÜ Seybothenreuth 222	3.3	Untersuchungsplanung an der EÜ Seybothenreuth 226
3	Bestand und Zustand der EÜ Seybothenreuth 224	3.4	Vorläufige Auswertung und Einschätzung nach Diagnostik 227
3.1	Auswertung der Regelinspektionen – Erkennung einer Schadensentwicklung 224	3.5	Planung der Sanierungsmaßnahmen 229

4	Erste statische und geotechnische Betrachtung 231	7	Ergänzende geotechnische Untersuchungen 249
4.1	Vereinfachte 2D-FE-Simulation 231	7.1	Veranlassung 249
4.2	Geotechnische Berechnungen auf Grundlage der 1. Erkundungsphase 232	7.2	Erkundungsprogramm des 2. EKP (2022), BG 2 (2023) 249
4.2.1	Erkundungsprogramm der 1. EKP (2018) 232	7.2.1	Aufschlussarbeiten 249
4.2.2	Geotechnische Berechnung auf Grundlage der 1. EKP (2018) 234	7.2.2	Geologische Schichteinheiten und Baugrubbeschreibung 251
4.3	Ergänzende 3D-FE-Betrachtungen für Boden und Bauwerk 234	7.2.3	Geomechanische Kenngrößen (BG2 2023) 254
5	Ableitung der Belastungsfahrt 238	7.3	Ergänzende geotechnische Nachweisführung 257
5.1	Planung für eine Lok-Belastungsfahrt 238	7.4	Vergleich der FE-Modellierungen mit den in den Setzungsberechnung verwendeten Eingangsgrößen (Bericht 1+2) 260
5.1.1	Lasten & Laststellungen 239	7.5	Vergleich Belastungsfahrt mit den Setzungsberechnungen (nach DIN 4019) 264
5.1.2	Messtechnik 241	8	Messwertgestützte statische Nachweisführung 265
5.2	Durchführung 245	8.1	Durchführung der statischen Berechnung mit kalibriertem 3D-FE-Modell 265
5.2.1	Messung 245	8.2	Ergebnisse und Auswertung 266
5.2.2	Messwerterfassung 246	9	Zusammenfassung und Ausblick 268
5.3	Messwertaufbereitung/Messwertzuordnung 246		Literatur 269
5.3.1	Aufbereitung/Zuordnung der mechanischen Messwerte 246		
5.3.2	Vergleich beider Messsysteme 247		
6	Auswertung der Belastungsfahrt 247		
6.1	Vergleich beider Messsysteme 247		
6.2	Ermittlung repräsentativer Messwerte 248		

## E Innovationen im Mauerwerksbau

### E 1 Innovative Produkte im Mauerwerksbau 271

Dieter Heller, Ahmad Iravani, Wolfgang Jachmich, Christian Franke, Andreas Krechting

1	Einleitung und Struktur des Beitrags 273	4	Mauertafeln aus Leichtbeton 280
2	Nachhaltiges und effizientes Bauen mit Mauerwerk aus Leichtbeton 274	4.1	Serielles und modulares Bauen 280
2.1	Forschung und Entwicklung 277	4.2	Elemente und Fertigteile aus Leichtbeton 281
2.2	Effizient bauen im System 277	4.3	Technische Regeln zur Bauteilbemessung: Mauertafeln nach Norm und Zulassung 282
3	Großformatige Elemente aus Leichtbeton 278	4.4	Herstellung von Mauertafeln aus Leichtbeton 282
3.1	Effizienter bauen 278	4.5	Sicheres Transportsystem 283
3.2	Technische Eigenschaften und Material 279	4.6	Montage und Putzarbeiten 284
		4.7	Fazit 284
			Literatur 285

### E 2 Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten – Zusammenfassung und praktische Hinweise 287

Roland Göttig, Juan Romero Amaya, Mai-Khanh Talke, Carole Binsfeld, Klaus Sedlbauer, Thomas Auer

1	Einführung 289	2.3	Fazit bezüglich anwendbarer klimatischer Randbedingungen 294
2	Klimatische Randbedingungen 289	3	Auswahl der Modellgebäude 294
2.1	Klimadaten 291	4	Randbedingungen und Anforderungen 295
2.2	Klimaanalyse 291	4.1	Allgemeine Randbedingungen 295
2.2.1	Repräsentative Standorte 291	4.2	Interne Wärmequellen 296
2.2.2	Vergleich der Standorte 293	4.3	Luftwechsel und Fensterlüftung 296
2.2.3	Vergleich der TRY-Wetterdatensätze und der Messdaten 293		

4.4	Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und DIN 4108-2:2013-02	298	8.2	Sommerlicher Wärmeschutz	307
4.5	Sommerlicher Komfort	298	8.2.1	Übertemperaturhäufigkeit	307
4.5.1	DIN EN 15251:2012-12	298	8.2.2	Statistische Analyse	308
4.5.2	DIN EN 16798-1:2022-03	300	8.2.3	Design-Frame	309
4.6	Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz	300	8.2.4	Fazit zum sommerlichen Wärmeschutz	311
5	Bauteilaufbauten	301	8.3	Energiebedarf und Sektorkopplung	311
6	Variantenmatrix	303	8.4	Tragfähigkeit, Schallschutz und weitere Parameter	312
7	Grundlagen der thermischen Simulationen	304	9	Fazit und Ausblick	313
8	Auswertung der Ergebnisse	305	9.1	Bewertung der Methodik	313
8.1	Winterlicher Wärmeschutz	305	9.2	Validität der Ergebnisse	314
8.1.1	Heizenergiebedarf	305	9.3	Hinweise für mögliche normative Vorgaben und Vereinfachungen	314
8.1.2	Statistische Analyse zum winterlichen Wärmeschutz	306	9.4	Danksagung	315
8.1.3	Fazit zum winterlichen Wärmeschutz	307		Literatur	315

### **E 3 Ökologische Lebenszyklusbilanzierung eines Wohngebäudes** 319

Zakaria Istanbuly, Wolfgang Eden, Martin Schäfers, Cedric Muth, Frédéric Tollemer

1	Fragestellung	321	4	Ökobilanzanalyse	326
2	Beschreibung des betrachteten Gebäudes	321	4.1	Variantenvergleich GWP und PE <sub>NRT</sub>	326
3	Variantenbildung	323	4.1.1	Treibhauspotenzial (GWP)	326
3.1	Kalksandstein	323	4.1.2	Nicht erneuerbare Primärenergie (PE <sub>NRT</sub> )	328
3.2	Holztafelbau	324	4.1.3	Weitergehende Auswertung	328
3.3	Ergebnisse der GEG-Nachweise	324	4.2	Betrachtung nach Bauteilen	329
			4.2.1	Auswertung der Außenwände	330
			4.2.2	Auswertung der Decken	330
			5	Fazit	331
				Literatur	332

### **F Forschung**

#### **F 1 Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau** 333

Philipp Hofmann

1	Laufende Forschungsvorhaben	336	1.2.3	Tragende Lehmsteine auf Basis von Recyclinggranulaten aus Reststoffen der Gipsgewinnung und Thüringer Lehmvorkommen – Entwicklung und Prüfung tragender Lehmsteine und Wandkonstruktionen aus Lehmsteinmauerwerk (Kurztitel: CLAYBLOC)	340
1.1	Übersicht der Forschungsvorhaben	336	1.2.4	InDeckLe – Innovative Deckenkonstruktionen aus Lehmverbund in industrieller Bauweise	342
1.2	Kurzberichte	336			
1.2.1	Entwicklung eines Bemessungskonzepts für Lehmmauerwerkswände unter Schubbeanspruchung	336			
1.2.2	Trag- und Verformungsverhalten von Trockenmauerwerkswänden mit Verzahnungskonfiguration unter seismischen Einwirkungen	338			

2	Abgeschlossene Forschungsvorhaben 345	2.2.4.2	Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein-Plan- elementsystemen als Optimierungszusatz für die Kalksandsteinproduktion (AiF-Nr. 21068-N) 363
2.1	Übersicht der Forschungsvorhaben 345	2.2.4.3	Produktion von CO <sub>2</sub> -armen Öko-Mauer- steinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brechsanden (AiF-Nr. 21860 N) 364
2.2	Kurzberichte 345	2.2.4.4	Ermittlung von Grundlagen zur Produktion von nachhaltigen Kalksandsteinen mit minimierter CO <sub>2</sub> -Last (AiF-Nr. 22796-N) 365
2.2.1	Lehmtafelbauweise – Vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände 345	2.2.4.5	Steigerung des Recyclinganteils 366
2.2.2	Einsatz von Porenbetonreststoffen in der Kalksandsteinproduktion 348		
2.2.3	Experimentelle Untersuchungen von Schubwänden aus Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung 355		
2.2.4	Forschungsvorhaben der Forschungs- vereinigung Kalk-Sand e. V. 362		
2.2.4.1	Einsatz von calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion – Alkalifänger (AiF-Nr. 21067-N) 362		
<b>F 2</b>	<b>Experimentelle und numerische Untersuchungen am Außenwand-Decken-Knoten 367</b>		
	Jonathan Meißner, Detleff Schermer, Franziska Amberger, Philipp Hofmann		
1	Einleitung 369	4	Experimentelle Untersuchungen des Außenwand-Decken-Knotens 387
2	Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss exzentrischer Lasteinleitung auf die Trag- fähigkeit von Mauerwerkswänden 369	4.1	Versuche am Gesamtsystem des Außenwand-Decken-Knotens 387
2.1	Datenerhebung vorhandener zentrischer und doppeltzentrischer Druckversuche 370	4.1.1	Versuchsaufbau 387
2.2	Analyse der Versuchsergebnisse 372	4.1.2	Ermittlung der Moment-Rotation- Interaktion 389
2.3	Einfluss des Lastneigungswinkels 375	4.1.3	Lastprogramm 390
2.4	Analytische Spannungsverteilung auf Querschnittsebene 376	4.2	Versuchsergebnisse 391
2.5	Zusammenfassung 377	4.2.1	Materialeigenschaften 391
3	Exzentrische Teilebenenbelastung an Wandprüfköpfen 378	4.2.2	Moment M <sub>K</sub> – Rotation φ <sub>K</sub> – Interaktion 391
3.1	Herstellung der Prüfkörper 379	4.2.3	Wandkopf- und Wandfußrotation 392
3.2	Materialeigenschaften des verwendeten Planhochlochziegels 380	4.3	Zusammenfassung und Ausblick 392
3.3	Versuchsergebnisse 380	5	Numerische Untersuchungen zur nicht- linearen Schnittgrößenermittlung am Außenwand-Decken-Knoten 393
3.3.1	Zentrische Beanspruchung 380	5.1	Numerisches Modell 393
3.3.2	Beanspruchungssituation am Wandfuß 381	5.2	Berechnungsparameter 394
3.3.3	Beanspruchungssituation am Wandkopf 383	5.2.1	Geometrie- und Materialparameter 394
3.3.4	Moment-Krümmungs-Beziehungen 385	5.2.2	Lastparameter 394
3.3.5	Experimentelle Moment-Krümmungs- Beziehung 385	5.2.3	Bemessungswert des Tragwiderstands 395
3.4	Zusammenfassung 386	5.3	Auswertung 395
		5.3.1	Vollaufgelagerte Decke 395
		5.3.2	Teilaufgelagerte Decke 397
		5.4	Zusammenfassung 400
		6	Fazit 401
			Literatur 402

A Normen und Baustoffe

**A 5 Mineralschaum – Einblick in Forschung  
und Entwicklung eines neuen Dämmstoffs**

Klemens Laub, Attila Höchst, Mirko Landmann  
und Barbara Leydolph

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>75</b>
<b>2</b>	<b>Herstellung von Mineralschäumen</b>	<b>75</b>
2.1	Herstellungsverfahren	75
2.2	Gesetzliche Regelung und Zulassung	76
2.3	Herausforderungen und Möglichkeiten	76
2.4	Forschungs- und Entwicklungsgegenstand am IAB	78
2.5	Erstarrungsverhalten von Mineralschaum	80
2.6	Qualitätssicherung in der Produktion	80
2.6.1	Ausgangsstoffe	80
2.6.2	Monitoring des Herstellungsverfahrens	80
<b>3</b>	<b>Auswahl bauphysikalischer Eigenschaften</b>	<b>81</b>
3.1	Schwinden des Mineralschaums	81
3.2	Trocknungsverhalten verfüllter Hochlochziegel	82
3.3	Nass- und Trockenrohdichte, Wärmeleitfähigkeit	83
3.4	Massenhydrophobierter Mineralschaum	84
3.4.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	85
3.4.2	Wasseraufnahme von Hochlochziegeln nach DIN EN 772-11:2011	86
3.4.3	Kapillares Wasseraugen von Hochlochziegeln	86
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>87</b>
	<b>Literatur</b>	<b>88</b>

## 1 Einleitung

Wärmedämmbaustoffe werden auf dem Markt als unterschiedliche Produkte angeboten und sind in vielen Anwendungen Stand der Technik. Grundlegend können Wärmedämmbaustoffe (ohne Naturdämmstoffe) in Dämmbaustoffe auf

- organischer Rohstoffbasis und
- mineralischer Rohstoffbasis unterteilt werden.

Je nach Anwendungszweck besitzen beide Baustofftypen Vor- und Nachteile.

Bisher beherrschen organische Dämmstoffe und Steinwolle den Markt gegenüber anderen mineralisch basierten Dämmstoffen. Durch Optimierung der Rezepturen und Anpassung der Herstellungsverfahrenstechnik versuchten auch Hersteller weiterer mineralischer Dämmstoffe, die Rohdichten und damit die Wärmeleitfähigkeit zu senken. Aufgrund dessen sind derzeit einige mineralisch basierte Produkte am Baustoffmarkt verfügbar, die mit den organischen Dämmstoffen konkurrieren (Tabelle 1).

Die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten besitzen organische Dämmstoffe mit dem Nachteil, dass diese im Brandfall eine erhöhte Brandlast darstellen und toxikologisch bedenkliche Gase freisetzen. Organischen Wärmedämmstoffen sind zwar brandhemmende Additive beigesetzt, allerdings verhindern diese die Entflammung nicht vollständig und werden aus Gesichtspunkten des Umweltschutzes und Recyclings kontrovers diskutiert. Als Alternative verbleiben nur noch mineralische Wärmedämmbaustoffe wie Mineralwolle, Perlite oder Mineralschäume. Im Bereich von Mauersteinen belegen Mineralwolle-Pads das größte Marktsegment, gefolgt von Perliten. Nur wenige Hersteller wenden derzeit Mineralschäume an. Hierbei gewinnen Aspekte des Ressourcenschutzes und des Recyclings eine immer höhere Bedeutung.

Der Markt zeigt mittlerweile, welche Möglichkeiten es gibt, Mauersteine mit einem Wärmedämmstoff auszustatten. Dabei bedarf jeder Dämmstoff seiner eigenen spezifischen Verfahrenstechnik, um ihn in den Mauerstein einzubringen: Stecken, Schütten oder Verschäumen (Tabelle 2).

Stecklinge und Schüttungen können von eigens darauf spezialisierten Herstellern von Mauersteinwerken gekauft werden. Die Verschäumung, d. h. die Schaum-

**Tabelle 1.** Auswahl etablierter Wärmedämmstoffe

Wärmedämmstoff	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/(m K)]
Glaswolle	100–150	35–50
Steinwolle	15–150	35–50
Schaumglas	100–150	45–60
Polystyrol	15–40	33–40
Polyurethan	30–50	23–30

**Tabelle 2.** Übersicht über die Möglichkeiten zum Einbringen von mineralischen und organischen Wärmedämmstoffen in Mauersteine

	Steckling	Schüttung	Verschäumung
Mineralisch	Mineralwolle	Perlit	Mineralschaum
Organisch	Phenolharz-Schaum	EPS	

herstellung und Verfüllung, stellt im Gegensatz dazu ein Verfahren dar, welches eigenverantwortlich im Werk erfolgen muss. Dies führt zu einer Reihe von Herausforderungen, aber auch neuen Möglichkeiten, worauf nachfolgend noch eingegangen wird. Die Verschäumung von Mauersteinen ist noch kein breitflächig etabliertes Verfahren, sondern derzeit Gegenstand der Forschung und Entwicklung.

Die mineralische Zusammensetzung des erhärtenden Schaums führt – neben seinen Wärmedämmmeigenschaften – zu einer Reihe von potenziell vorteilhaften Produkteigenschaften:

1. Hinsichtlich der Brennbarkeit sind Mineralschäume in die Brandklasse A1 einzuordnen.
2. Die Deponieuordnungsklasse nach LAGA M20 ist Z1.2.
3. Die Recyclingfähigkeit wird als unproblematisch angesehen, wenn es sich um erhärtete, zementgebundene Systeme handelt, die recycelt werden können. Mineralschaum kann darüber hinaus leicht mechanisch aufbereitet werden.
4. Das spröde mechanische Verhalten des Bindemittels in Kombination mit der niedrigen Dichte bzw. dem hohen Luftporenanteil führt zu einem formstabilen, aber dennoch gut sägbaren Dämmstoff.

## 2 Herstellung von Mineralschäumen

### 2.1 Herstellungsverfahren

Die Herstellung eines hochwärmehämmenden Mineralschaums, der seine Porosität nicht durch einen chemischen Gasbildungs- oder einen thermischen Herstellungsprozess erhält, erfolgt durch physikalisches Dispersion von Luft in ein flüssiges Medium. Dabei werden die Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Gas durch grenzflächenaktive Stoffe (Schaumbildner) stabilisiert. Die Verwendung von hydraulisch erhärtenden Bindemitteln führt zu einer Verfestigung der gebildeten Schaumstruktur. Bei physikalisch geschäumten Mineralschäumen handelt es sich um Schäume, die nicht durch die Verwendung treibender, sondern luftporenbildender Zusatzmittel (z. B. Tenside oder Proteine) hergestellt werden. Durch das physikalische Schäumen lassen sich in der Regel geringere Dichten – und damit geringere Wärmeleitfähigkeiten – erreichen als beim chemischen Aufschäumen von Bindemittelsuspensionen.

Mineralschaum wird im Gegensatz zu Mineralwolle (Steckling) oder Perlit (Schüttung) flüssig und im frischen Zustand in den Mauerstein verfüllt. Allein dieser Umstand zieht eine Reihe von stofflichen, verfahrenstechnischen und ökonomischen Konsequenzen nach sich. Er eröffnet aber auch gänzlich neue Möglichkeiten. Es werden dadurch bauphysikalisch optimierte Lochbilder für Mauersteine umsetzbar, die im Gegensatz zu den Lochbildern für Stecklinge feingliedrige und nichtrechteckige Geometrien enthalten können. Der Mineralschaum wirkt sich damit nicht nur direkt auf die Produkteigenschaften zukünftiger Mauersteine aus, sondern auch indirekt, indem er neuartige Geometrien zulässt, die bis dato von der Beschaffenheit marktüblicher Dämmstoffe vorgegeben wurden. Dabei ist jedoch bei einer zunehmenden Komplexität der Lochbilder mit einem steigenden verfahrenstechnischen Aufwand bei der Verfüllung zu rechnen. Ein weiterer Vorteil mineralischer Wärmedämmsschäume besteht darin, dass sie direkt vor Ort, möglicherweise unter Verwendung lokal vorkommender Materialien, produziert werden können. Der wesentliche ökologische Vorteil hierbei ist, dass Transportwege und damit Energie eingespart werden können. Statt vorproduzierter Wärmedämmstoffe, die einen hohen Volumenanteil Luft enthalten, werden beim Einsatz von Schaumverfüllungen lediglich Rohstoffkomponenten transportiert. Darüber hinaus ergeben sich Einsparmöglichkeiten bei Logistikkosten, da die Lagerhaltung der Rohstoffkomponenten platzsparender ist. Da der Mauersteinhersteller nun selbst in die Position des Dämmstoffherstellers treten kann, hat er zunächst mit Investitionskosten hinsichtlich Maschinen- und Anlagentechnik zu rechnen. Der Betrieb einer Schaumanlage zur Verfüllung von Mauersteinen erfordert einen hohen Technologisierungsgrad und zudem komplexe, umfangreiche Vorgänge bei der Rohstoffbeschaffung und Produktion. Des Weiteren ist eine spezifische Weiterbildung des Fachpersonals, insbesondere des Anlagenführers, erforderlich.

## 2.2 Gesetzliche Regelung und Zulassung

Für den Einsatz alternativer mineralischer Dämmstoffe, wie mineralische Wärmedämmsschäume, gelten lediglich nationale technische Anwendungsnormen, die von Herstellerland zu Herstellerland variieren [1]. Ziel für solche Wärmedämmstoffe muss es sein, dämmstoffspezifische, harmonisierte Normen und Anwendungsregeln durch ein umfangreiches Fachwissen zu etablieren. Anwendungsnormen zur Verwendung von mineralischen Schäumen sind noch nicht existent. Für die Funktionalität, die den Baustoff, das Produktionsverfahren, wie auch die Anwendung einschließt, sind umfangreiche Aspekte bis hin zu den Anforderungen an eine bauaufsichtliche Zulassung zu untersuchen.

Schmidt [2] gibt dazu einen Überblick über den Zulassungsprozess und die aktuelle Entwicklung. Für das Jahr 2022 stellt er fest: „Für Leichtbetonsteine mit

einer Dämmstofffüllung aus Mineralschaum wurden bislang zwei allgemeine bauaufsichtliche Zulassungenerteilt.“

## 2.3 Herausforderungen und Möglichkeiten

Wie bereits eingangs dargelegt, erfolgt die Herstellung und Verfüllung des Mineralschaums im Mauersteinwerk. Der Mauersteinhersteller wird damit zum Dämmstoffhersteller, der eine entsprechende Expertise auf dem Gebiet des Herstellungsprozesses benötigt. Während die kontinuierliche Herstellung eines mineralischen Schaums zunächst Stand der Technik und unproblematisch ist, ergeben sich bei der Verfüllung von Mauersteinen besondere Herausforderungen. Aufgrund des kapillaren Saugens des umgebenden Materials (z. B. Ziegel, Leichtbeton) kann dem frischen, verfüllten Schaum innerhalb kurzer Zeit Wasser entzogen werden. Dieser Vorgang – nachfolgend als Wassermigration bezeichnet – ist im Wesentlichen abhängig von der Porosität und der bereits bestehenden Wassersättigung des Wandbaustoffs sowie dem Wasserrückhaltevermögen des Mineralschaums. In dieser sehr frühen Phase nach dem Verfüllen kann es daher zu einer Ortsveränderung des Wassers innerhalb des Mauersteins kommen, während eigentliche atmosphärische Trocknung erst danach erfolgt. Die Konsequenz aus der Wassermigration im Mauerstein ist, dass der frische Mineralschaum „vertrocknet“ bzw. „aufbrennt“, noch bevor er erstarrt und erhärtet. Folglich wird der Mineralschaum instabil, da sein formgebendes und damit tragendes Gerüst zu diesem Zeitpunkt noch aus Wasser und Schaumbildner besteht. Wird ein kritischer Verlust an Wasser erreicht, noch bevor sich das Feststoffgefüge im Mineralschaum stabilisieren konnte, kommt es zu Setzungen, Rissen und schlussendlich zum Kollaps der gesamten Porenstruktur. Dieser Vorgang lässt sich qualitativ beobachten, da sich ausgehend vom frisch verfüllten Schaum eine Wasserfront im Mauerstein ausbildet (Bilder 1 und 2), die zeitlich einhergeht mit der Destabilisierung des Mineralschaums. Zur besseren Charakterisierung der Wassermigration wurde ein Verfahren entwickelt, um



**Bild 1.** Sichtbare Wassermigration innerhalb eines Hochlochziegels (Foto: IAB)



**Bild 2.** Destabilisierter Mineralschaum in einem Hochlochziegel infolge der Wassermigration (Foto: IAB)

die Wechselwirkung zwischen dem Wasserrückhaltevermögen eines Mineralschaums und dem kapillaren Saugen eines Mauersteins zu quantifizieren.

Hierfür wird ein Segment aus einem Mauerstein gesägt und anschließend auf Massekonstanz getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Die Kammern des Segments werden daraufhin mit dem Mineralschaum verfüllt. Der Beginn der Verfüllung kennzeichnet den Beginn der Wassermigration. Zu einem definierten Zeitpunkt nach der Verfüllung wird der Mineralschaum zügig und möglichst sauber aus den Kammern entfernt – damit endet für dieses Segment die Wassermigration. Da das Entfernen des Mineralschaums nicht vollständig rückstandsfrei erfolgen kann, wird die Masse der verbliebenen Anhaftungen durch erneutes Trocknen des Segments auf Massekonstanz bestimmt. Die Menge des Wassers, welches sich nach Entfernen des Mineralschaums im Segment befand, kann aus dem Trockengewicht des Segments, dem Gewicht des Segments direkt nach dem Entfernen des Mineralschaums und den ermittelten verbliebenen Anhaftungen bestimmt werden. Anhand der bekannten Abmaße des Segments sowie der Eigenschaften des verfüllten Mineralschaums (Dichte, Wasseranteil) können zeitabhängig die Wasseraufnahme des Segments und der ver-

bliebene Anteil des Wassers im Mineralschaum berechnet werden.

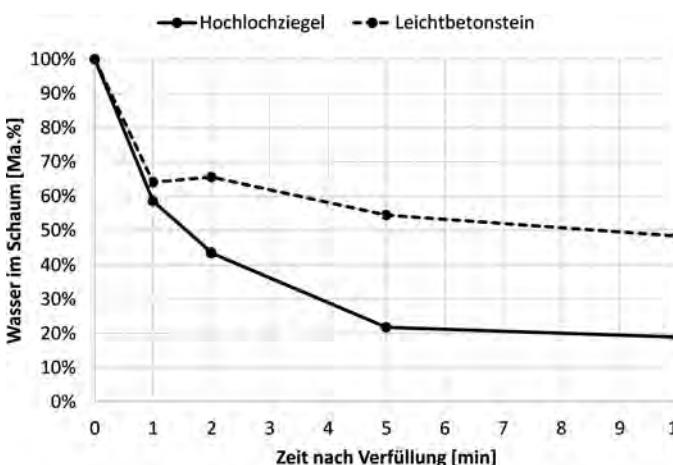
In der nachfolgenden Untersuchung wurden auf diese Weise drei verschiedene Mineralschaumrezepturen in zwei verschiedenen Mauersteinsorten untersucht. Die Mineralschäume unterschieden sich lediglich im Typ des Bindemittels. Die Mengen der Bestandteile und die Dichten ( $\rho_{\text{frisch}} = 120 \text{ g/dm}^3 \pm 4 \text{ g/dm}^3$ ) der frischen Mineralschäume sind gleich gehalten. Bei den Mauersteinen handelt es sich um einen Hochlochziegel und einen Leichtbetonstein.

Die gewonnenen Werte zeigen, dass bereits fünf Minuten nach dem Verfüllen annähernd 80 % des Wassers aus dem Mineralschaum in den Scherben des Hochlochziegels gesaugt werden (Bild 3). Die Wahl des Bindemittels kann den Umfang der Wassermigration zu einem gewissen Grad reduzieren (Bild 4). Die Wassermigration in den gewählten Leichtbetonstein läuft weniger umfangreich und langsamer ab.

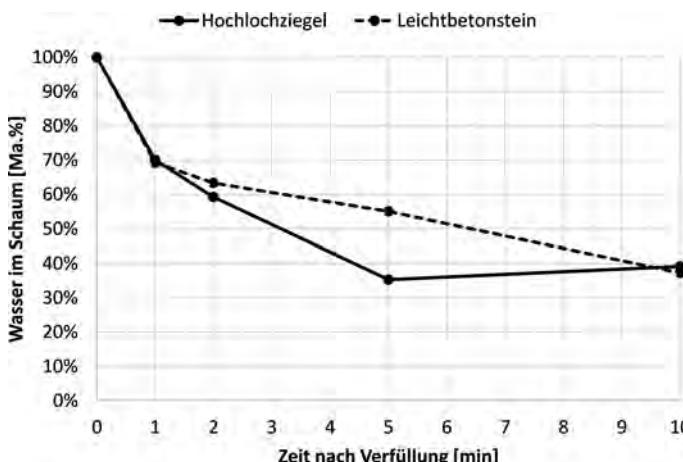
Neben der einsetzenden Wassermigration im Mauerstein gibt es noch weitere Einflüsse, die sich auf die Qualität des Mineralschaums negativ auswirken können:

1. Koaleszenz und Ostwald-Reifung,
2. Mechanische Einflüsse.

Die **Koaleszenz** und die **Ostwald-Reifung** sind zwei verschiedene kolloidchemische Prozesse, die in dispersen Systemen ablaufen. Die Koaleszenz beschreibt das Zusammenwachsen von kleineren Luftporen zu größeren Luftporen, wobei die Gesamtoberfläche der Luftporen abnimmt. Im Gegensatz dazu beschreibt die Ostwald-Reifung das Wachstum von größeren Luftporen auf Kosten von kleineren Luftporen, wobei die Gesamtoberfläche der Luftporen zunimmt. Die Ostwald-Reifung beruht auf der Krümmungsabhängigkeit des Dampfdrucks, während die Koaleszenz durch die Abnahme der Grenzflächenenergie begünstigt wird. Beide Prozesse führen zu einem grobporigeren Mineralschaum mit höheren Wärmeleitfähigkeiten bei gleicher Dichte. Ursächlich hierfür ist wiederum der konvekti-



**Bild 3.** Verbliebenes Wasser im Mineralschaum des Bindemittelsystems 1 infolge der Wassermigration



**Bild 4.** Verbliebenes Wasser im Mineralschaum des Bindemittelsystems 2 infolge der Wassermigration

ve Wärmetransport innerhalb der Luftporen, der mit zunehmender Größe schneller erfolgt.

Neben den destabilisierenden Einflüssen, die dem Mauerstein und dem Mineralschaum selbst entspringen, gibt es **mechanische Einflüsse**, die von außen einwirken können. Zu diesen Einflüssen gehören Beschleunigungen, die kurz nach der Verfüllung auftreten können. Dabei handelt es sich um verfahrenstechnische Beanspruchungen der frisch verfüllten Mauersteine wie Anfahren, Abbremsen und Stöße, die sich aus dem Verfahrensablauf ergeben. Beispielhaft seien hier das Bewegen der Bretter ins Lager bzw. die Erhärzungskammer und das Abheben von Mauersteinen, um sie zu stapeln und zu paketieren, genannt.

Die hier aufgeführten Einflüsse sollen verdeutlichen, welche hohen Anforderungen an die industrielle Verfüllung von Mineralschäumen in Mauersteine gestellt werden. Werden keine Maßnahmen ergriffen, wird durch den hohen Wasserverlust, die Koaleszenz und die Ostwald-Reifung sowie die mechanischen Beanspruchungen die Qualität des Mineralschaums zwangsläufig leiden.

## 2.4 Forschungs- und Entwicklungsgegenstand am IAB

In Anbetracht dieser Herausforderung wurde seitens des IAB ein Herstellungsverfahren für Mineralschaum entwickelt, welches dessen Stabilität in stark saugender Umgebung sicherstellt. Der negative Einfluss der Wassermigration auf die Mineralschaumqualität sollte dabei nicht über die Vorbehandlung der zu verfüllenden Mauersteine minimiert werden, sondern durch die Beschleunigung des Erstarrungsverhaltens des Mineralschaums. Etwasige Vorbehandlungsschritte, beispielsweise die Wassersättigung der Mauersteine oder die Imprägnierung der Kammerinnenflächen, erwiesen sich aus verfahrenstechnischer und ökonomischer Sicht als ungünstig.

Das vom IAB entwickelte und patentierte Verfahren [3] zur Herstellung eines schnellerhärtenden Mineralschaums beruht auf dem Mischen von zwei Mineralschäumen, die auf verschiedenen hydraulischen Bindemitteln basieren (Bild 5). Reagieren diese beiden Bindemittel miteinander, erfolgt die Beschleunigung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens. Über das Verhältnis beider Schäume zueinander lässt sich der Erstarrungsbeginn steuern. Es zeigte sich während der Entwicklungsarbeit, dass zwei Schäume effektiver miteinander homogenisiert werden können als ein Schaum mit einer Suspension bzw. ähnliche Ansätze. Die Auslegung des Mischrohrs spielt in diesem Verfahren eine zentrale Rolle. Die Herstellung und Förderung beider Mineralschäume erfolgt hierbei kontinuierlich. Durch das Mischen beider Mineralschäume wird ein Teil des im hergestellten 2-komponentigen Schaum (kurz 2K-Schaum) befindlichen Wassers innerhalb weniger Minuten chemisch gebunden, während sich gleichzeitig ein tragfähiges Gefüge aufbaut. Infolgedessen bleibt der 2K-Schaum trotz weiter voranschreitenden Wassereintrags durch den Mauerstein stabil.

Der beschleunigte Strukturaufbau wirkt sich ebenso auf das Zusammenwachsen der Luftporen im Mineralschaum durch Koaleszenz und Ostwald-Reifung aus, welche eines labilen, reversiblen Gefüges bedürfen. Durch die rasche Bildung eines plastischen, irreversiblen Gefüges kann ein fortschreitendes Zusammenwachsen verhindert werden, wodurch ein feinporiger Mineralschaum sichergestellt wird. Aus verfahrenstechnischer Sicht ermöglicht ein schnell erstarrter Mineralschaum weitere Vorteile, denn die verfüllten Mauersteine lassen sich zügiger abheben und paketieren. Ein Herausfließen des Mineralschaums aus dem Mauerstein ist nach wenigen Minuten nicht mehr möglich.

B      Gestaltung und Konstruktion (Neubau)

**B 1   Von der Handarbeit zur Hochtechnologie  
im Reallabor: Die Möglichkeit der BIM-basierten  
Planung und effizienten Produktion von  
Ziegelwänden durch Roboter**

Stefan Biersack, Marc Schmailzl, Thomas Linner, Friedrich Eder  
und Mathias Obergrießer

## Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung 103**
- 2 Reallabor „Building Lab“ 103**
- 3 Bauindustrie und Baurobotik 103**
- 4 End-to-End-Workflow 104**
  - 4.1 Softwareabhängiger Closed-BIM-Ansatz 104
  - 4.2 Softwareunabhängiger Open-BIM-Ansatz 105
  - 4.3 Versuchsaufbau im Reallabor 105
- 5 Diskussion 108**
- 6 Fazit und Ausblick 108**
- Literatur 108**

## 1 Einleitung

Ziegel zählen zu den ältesten Baumaterialien der Menschheit (7000 v. Chr.). Trotz ihrer weitreichenden Historie hat sich der Arbeitsprozess im Wesentlichen kaum verändert: vom Auftragen des Mörtels über das Setzen der Ziegel bis hin zum Glätten mit der Kelle. Angesichts der aktuellen Herausforderungen (z. B. Fachkräftemangel, Digitalisierung, steigende Anforderungen an Effizienz, Präzision, Nachhaltigkeit sowie zunehmende Komplexität von Bauprojekten etc.) ist eine Weiterentwicklung des traditionellen Maurerhandwerks erforderlich. Das Erschließen von Building-Information-Modeling(BIM)-basierten, datengestützten, digital integrierten und maschinellen/robotischen Bauprozessen kann es dem Handwerk ermöglichen, effizient und zukunftsfähig zu bleiben. In diesem Kontext spielen BIM-basierte Praktiken (ganzheitliche und bauteilorientierte Gebäudeplanung vom Entwurf über die Ausführung bis hin zur Instandhaltung) und nahtlose digitale Ketten (End-to-End-Workflows) eine entscheidende Rolle. Im Zuge dessen kann auf bestehenden Softwareansätzen bzw. Arbeitsweisen aufgebaut und der bestehende Workflow mittels Roboter erweitert bzw. optimiert werden (z. B. insbesondere Übernahme von repetitiven oder körperlich belastenden Bauprozessen etc.). Die Anwendung von Robotik (insbesondere auf der Baustelle) ist jedoch aufgrund der dynamischen Baustellenumgebungen mit wechselnden Einflüssen (z. B. unterschiedliche Witterungsbedingungen, Bodenbeschaffenheiten und Arbeitsflächengrößen etc.) als auch der damit verbundenen Komplexität assoziierter Bauprozesse (eine Vielzahl an Leistungsphasen, Gewerken und korrespondierenden Stakeholdern etc.) nur schwer planbar und technologisch herausfordernd. Um trotzdem eine adäquate Anwendung gewährleisten zu können, bedarf es eines flexibleren, effizienteren und digital bzw. technologisch gestützten Lösungsansatzes im Bauablauf. Dieser Beitrag versucht daher, durch eine BIM-basierte Workflowoptimierung und die bewusste Integration robotischer Produktionsprozesse eine erste Antwort auf die weitreichenden Fragen und Herausforderungen der Bauindustrie wie auch des Maurerhandwerks zu geben.

## 2 Reallabor „Building Lab“

Um nahtlose digitale Ketten (End-to-End-Workflows) und robotische Produktionsprozesse adäquat testen zu können, bedarf es einer Laborumgebung, welche nicht nur die praktische Umsetzung ermöglicht, sondern auch realphysische Rahmenbedingungen gewährleistet. Im Zuge dessen wurde die in diesem Beitrag vorgestellte Workflowoptimierung im sogenannten „Building Lab“ (Rudolf-Vogt-Straße 16, 93053 Regensburg, s. Bild 1) getestet, welches auf Initiative der Ostbaye-



**Bild 1.** Building Lab, Außenansicht (Foto: Stefan Biersack)

rischen Technischen Hochschule Regensburg (OTH) in Verbindung mit dem Bayerischen Bauindustrieverband e. V. gebaut und im Jahr 2023 eröffnet wurde. Das Gebäude erweitert den TechCampus Regensburg und etabliert sich sukzessive als Innovationszentrum für Digitalisierung im Bauwesen. Als zentrale Anlaufstelle für Industrie, Handwerk, Wirtschaft, Verwaltung und Politik bietet es eine Demonstrations- und Entwicklungsumgebung für innovative Bautechnologien sowie die Möglichkeit der Aus- und Weiterbildung für zukünftige Fachkräfte im Bauwesen. Derartige Einrichtungen zeigen die Bereitschaft und Möglichkeit (Inkubation) für technologische Weiterentwicklungen im Kontext der Bauindustrie.

## 3 Bauindustrie und Baurobotik

In diesem Abschnitt werden bestehende Bauprozesse erörtert, assoziierte Probleme, Herausforderungen wie auch Limitationen herausgestellt und konsequutive Handlungssimplikationen bzw. Forschungslücken abgeleitet, welche Grundlage für die BIM-basierte Workflowoptimierung und Integration robotischer Produktionsprozesse sind (s. Abschn. 4).

In der Regel werden heutige Bauprozesse oft von Generalplanern geleitet, welche verschiedene Fachplaner in etwaigen Leistungsphasen koordinieren. Diese Aufteilung kommt durch die technische Komplexität der individuellen Bauprozesse zustande, während iteratives Planen und regelmäßiger Austausch zwischen Bauherren und Planern notwendig sind, um die gegenseitigen Interessen bestmöglich abilden zu können. Diese Zusammenarbeit kann durch die Einführung von BIM-basierten Arbeitsweisen (oder auch Lean-Management) und assoziierten Softwarelösungen erleichtert werden, um ganzheitlich parametrisch modellieren bzw. planen zu können. Um jedoch die BIM-basierten digitalen Gebäudemodelle – bestehend aus (Bauteil-) Geometrie und Semantik – für robotische Produktionsprozesse aufzubereiten zu können, bedarf es einer se-

mantischen Prozess- und Informationsbeschreibung, welche in der Bauindustrie momentan noch nicht ausreichend dargestellt ist [1]. Daher gibt es bereits einige prototypische (Bottom-up-)Ansätze zur (nahtlosen) Einführung von produktionspezifischen Daten bzw. Informationen (Semantik) in frühe Leistungsphasen der Gebäudeplanung, um besserinformierte Bauprozesse durch Datenreicherung als auch bidirektionale Datentransfers zu gewährleisten [2]. Ansätze wie „Design for Manufacturing and Assembly“ (DfMA) wie auch „Fabrication Information Modeling“ (FIM) u. a. gehen dabei die ersten Schritte hin zu produktionspezifischen Daten bzw. Informationen, welche ein vorgeschaltetes produktionsgerechtes Modellieren erlauben und daher die Herstellung bzw. Montage erleichtern können, ohne dass sich Prozesse grundlegend ändern müssen. Nichtsdestotrotz fordert deren Integration bzw. Adaption im Sinne nahtloser digitaler Ketten (End-to-End-Workflows) ein Umdenken gängiger Planungsprozesse. In diesem Zusammenhang erschweren eine HOAI-basierte „Silodenkweise“ (aufbauend auf sequenziellen, isolierten Planungs-/Leistungsphasen, welche Probleme auf Nachfolgeprozesse verlagert, anstatt diese selbst oder kollaborativ zu lösen) und fehlende Anreize für eine kontinuierliche bzw. fortlaufende Zusammenarbeit erwähnte Effizienzsteigerungen im Bauwesen [3, 4]. Darüber hinaus stellen die unzureichende Daten- bzw. Informationsgüte und nicht inhärent-verbindliche Standards hinsichtlich des Datenaustauschs ein erhebliches Problem dar [5]. Dies wirkt sich besonders negativ auf die Bauausführung und die zugehörigen Vorbereitungen aus, da diese – bei zunehmendem Automationsgrad – von einer widerspruchsfreien, einheitlichen Informations- und Datenquelle abhängen. Daten bzw. Informationen werden oft isoliert und in verschiedenen Dateiformaten bzw. Datenbanken mit unterschiedlichen Nomenklaturen gespeichert, was wiederum zu Redundanzen und damit Datenfragmentierung führt. Daraus resultieren Korrekturschleifen und ein erheblicher Effizienzverlust, welcher Kostensteigerungen verursacht.

Die exemplarisch aufgeführten Probleme, Herausforderungen und Limitationen sollen durch die in diesem Beitrag vorgestellte Workflowoptimierung prototypisch adressiert werden (s. Abschn. 4), um nahtlose digitale Ketten (End-to-End-Workflows) wie auch robotische Produktionsprozesse zu ermöglichen. Die bewusste Integration robotischer Produktionsprozesse soll dabei den Menschen als integralen Bestandteil der Bauwertschöpfungskette nicht ersetzen, sondern ihm repetitive wie auch körperlich belastende Tätigkeiten abnehmen, sodass der Mensch für wertschöpfendere Aufgaben frei wird.

## 4 End-to-End-Workflow

Die Umsetzung der Workflowoptimierung wurde auf zwei verschiedenen Wegen implementiert. Im Zuge dessen wurde unterschieden, in welcher Form Daten bzw. Informationen zwischen den einzelnen Prozessschritten – von der (Bauteil-)Planung bis zur Produktion – ausgetauscht werden und wie stark diese von der entsprechenden Autorensoftware entkoppelt sind.

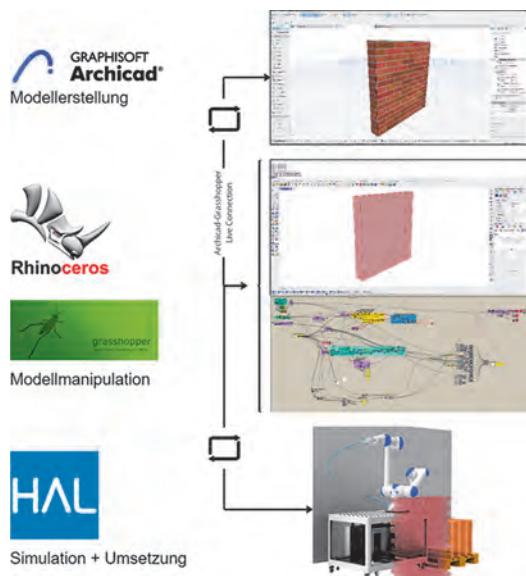
### 4.1 Softwareabhängiger Closed-BIM-Ansatz

Bei einem hohen Maß an Abhängigkeit zwischen den verwendeten Softwarelösungen spricht man von einem sogenannten Closed-BIM-Ansatz. Derartige Prozessketten zeichnen sich dadurch aus, dass sie zwar ein geringes Maß an Flexibilität hinsichtlich der zu verwendenden Software aufweisen, jedoch ergeben sich in der Regel durch die proprietären Datenschnittstellen in der Praxis Vorteile hinsichtlich der Interoperabilität innerhalb der gegenseitig integrierten Softwarelösungen. Dadurch wird auch die Nutzung für nicht (software)spezialisierte Nutzer gewährleistet. In dem hier implementierten Beispiel wurde „Grasshopper – Archicad Live Connection“ (Plugin für parametrische Echtzeitmodellierung via bidirektionalen Datenaustausch zwischen Archicad und Rhino/Grasshopper) verwendet (s. Bild 2). Das Plugin macht es möglich, die (Bauteil-)Modellierung in Archicad mit der Roboterprogrammierung und Simulation in Rhino/Grasshopper (via HAL Robotics Framework Plugin) zu verbinden. So wird verhindert, dass beim Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwarelösungen Daten verloren gehen und der Prozesskette nicht mehr zur Verfügung stehen könnten.

Im Folgenden wird der native bzw. proprietäre Datenaustausch (Closed-BIM-Ansatz) des Workflows konkretisiert:

- Rhino/Grasshopper zu Archicad: Der Planer beginnt mit dem Bauteilentwurf (Modellierung) in der Software Rhino (inkl. Grasshopper). Mit „Grasshopper – Archicad Live Connection“ (Plugin) kann er in Grasshopper (Softwareerweiterung/Plugin und visueller Algorithmeneditor in Rhino) Modelle (in Echtzeit) parametrisch entwerfen und direkt in Archicad-Bauelementtypen (z. B. Wände, Decken oder Stützen etc.) umwandeln.
- Archicad zu Rhino/Grasshopper: Der Planer beginnt mit dem Bauteilentwurf (BIM-Modellierung) in der Software Archicad. Mit Rhino (inkl. Grasshopper) und „Grasshopper Archicad Live Connection“ kann er Archicad-Bauelementtypen in Grasshopper referenzieren und (in Echtzeit) damit parametrisch weiterarbeiten.

Im Folgenden ist der beschriebene Workflow (Closed-BIM-Ansatz) entsprechend illustriert.



**Bild 2.** Schematisches Diagramm zum Workflow (Closed-BIM-Ansatz) am Beispiel einer Ziegelwand

#### 4.2 Softwareunabhängiger Open-BIM-Ansatz

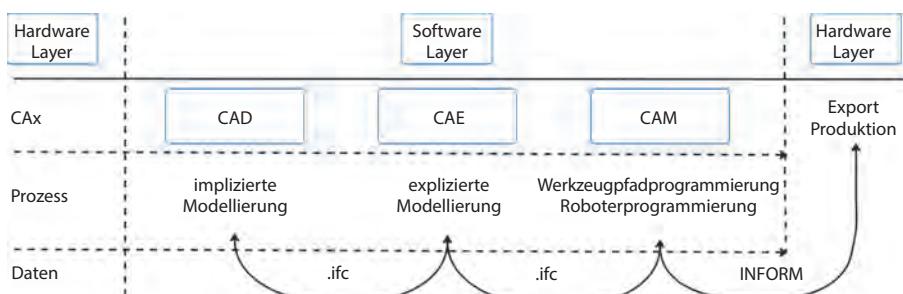
Als etablierter Industriestandard für den offenen, standardisierten Datenaustausch bauwerksbezogener Daten bzw. Informationen wird für den hier beschriebenen Open-BIM-Ansatz das IFC-Datenschema verwendet (s. Bild 3). Über einen IFC-Datensatz können somit geometrische und semantische Informationen über ein unabhängiges Schema zwischen den einzelnen Softwarelösungen ausgetauscht werden. In Archicad wird das (Bauteil-)Modell (Geometrie) als IFC-Step entworfen und mit den notwendigen Daten bzw. Informationen (Level of Information Need – LOIN) komplementiert (CAD/BIM-basierte Modellierung). Diese Datei lässt sich anschließend über entsprechende Rhino-Plugins (z. B. VisualARQ, GeometryGym etc.) nahtlos in Rhino importieren und in Grasshopper (Listenform) in die entsprechenden Input-Parameter für

die konsekutive Maschinensteuerung (via HAL Robotics Framework, CAM) eingepflegen.

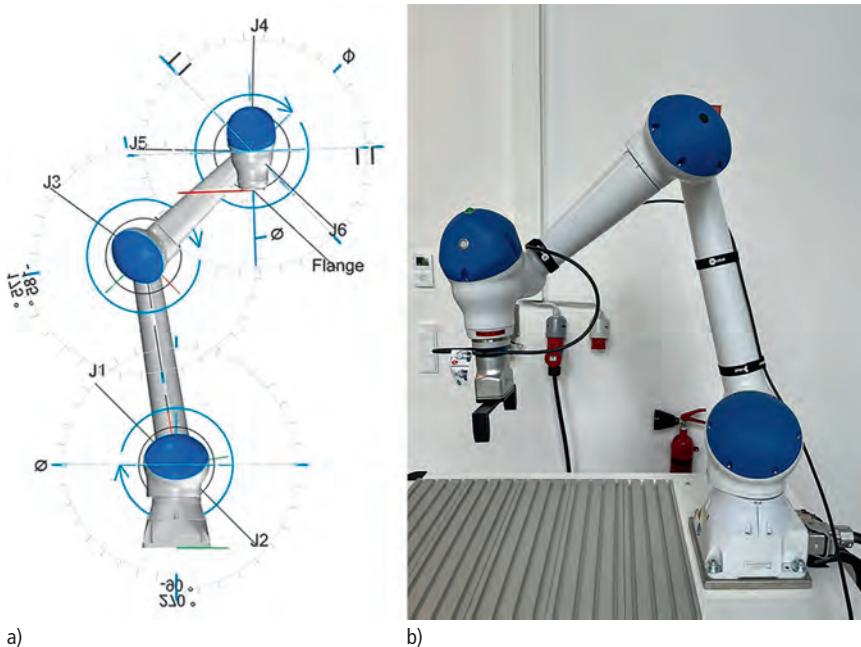
Die oben beschriebenen Ansätze ermöglichen zunächst den bidirektionalen Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwarelösungen, sodass auf gleichen Daten bzw. Informationen nahtlos aufgebaut werden kann (entweder durch entsprechende Softwareerweiterungen/Plugins oder durch IFC-basierten Datenaustausch). Im nächsten Schritt muss die bewusste Einführung und damit Anreicherung produktionsrelevanter semantischer Informationen im (BIM-)Modell konkretisiert werden, sodass bereits in frühen Leistungsphasen bauteilspezifische Informationen auf Produktionsprozesse zugeschnitten sind (z. B. via Custom-Property-Sets etc.). Hierzu können entsprechende Eigenschaften (z. B. Roboter- und/oder Werkstück-Spezifikationen etc.) in Custom-Property-Sets definiert und abgespeichert werden. In der Praxis können diese Daten bzw. Informationen zunächst in tabellarischer Form (z. B. CSV, XML etc.) angegeben werden und im Weiteren über ein „Konvertierungs-Skript“ (z. B. unter Nutzung von Python-Softwarebibliotheken, IfcOpenShell etc.) nahtlos in den IFC-Datensatz eingepflegt werden. Ferner kann mit einer direkten Anbindung an das Application-Programming-Interface (API) der jeweiligen Autorensoftware diese Middleware entfallen. Erwähnte Custom-Property-Sets können für einzelne Elemente eines BIM-Modells, aber auch für das gesamte Projekt vorgegeben und im IFC-Datenformat übergeben werden.

#### 4.3 Versuchsaufbau im Reallabor

Der zur Testung der Workflows am Beispiel einer Ziegelwand verwendete Roboter (s. Bild 4) ist ein kolaborativer Roboter (Yaskawa HC10, 6 Freiheitsgrade, elektrisch), welcher im Vergleich zu herkömmlichen Industrierobotern über zusätzliche Kraft-Momenten-Sensoren verfügt. Dadurch ist er besonders gut für die Zusammenarbeit mit Menschen geeignet, sodass nicht zwangsläufig zusätzliche Schutzvorrichtungen oder abgetrennte Arbeitsbereiche erforderlich sind (diese Entscheidung ist jedoch auch abhängig von der korrespondierenden Risikobeurteilung). Diese Eigenschaft



**Bild 3.** Schematisches Diagramm zum Workflow (Open-BIM-Ansatz)



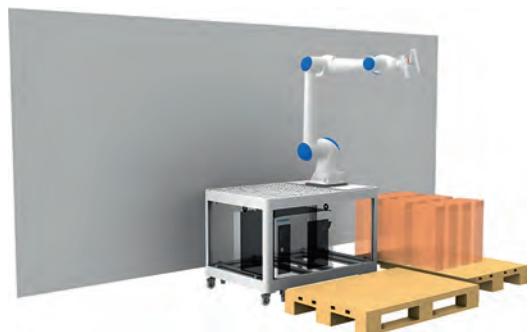
**Bild 4.** Roboteraufbau des Yaskawa HC10; a) Screenshot HAL Robotics Framework, b) realer Roboter  
(Foto: Stefan Biersack)

**Tabelle 1.** Überblick der Massenausnutzung in der Testung

Komponente	Eigen-gewicht	Traglast
Yaskawa HC10	58 kg	10 kg
On-Robot-Greifer	1,10 kg	7 kg vertikal bei 140 N
Ziegelstein DF (1,2/12) (Wandgröße: B × H = 2,00 m × 2,50 m)	1,45 kg	
Ausnutzungsgrad 2-Finger-Greifer (Endeffektor)	20,7 %	$= \frac{1,45}{7,0} \cdot 100 [\%]$
Ausnutzungsgrad Roboter	25,5 %	$= \left( 1,10 + \frac{1,45}{10} \right) \cdot 100 [\%]$

kann insbesondere im Baukontext vorteilhaft sein, da komplexe, dynamische Baustellenumgebungen eine gewisse Umgebungswahrnehmung bzw. Sensitivität (z. B. durch Sensorik) bedingen.

Für die Labortestung (s. Tabelle 1) wurde der Roboter auf einem Arbeitstisch mit integrierter Steuerungstechnik (SPS/PLC, Roboter-Controller im Unterbau) befestigt und darauf geachtet, dass die Auf- und Abgabepunkte der Ziegel (jeweils auf Europaletten) entsprechend dem Roboter-Arbeitsraum erreicht werden (s. Versuchsaufbau in Bild 5).



**Bild 5.** Versuchsaufbau im Labor des Building Lab  
(digitales Modell, Screenshot Rhino und Grasshopper mit HAL Robotics Framework)

Abschließend wurde für das adäquate Greifen der Ziegel ein 2-Finger-Greifer (Endeffektor) montiert, welcher in verschiedenen Iterationsschritten (Robot-Oriented-Design – ROD) entsprechend dem Ziegelformat (DF) weiter angepasst wurde (FDM 3D-Druck, Vergrößerung der Greiferzangen und Einsatz von Schrumpfschläuchen auf den Kontaktflächen für besseren Grip), sodass ein verbessertes Greifen möglich wurde (s. Bilder 6 und 7).

Letztlich wurde der Roboter über das HAL Robotics Framework (Grasshopper-Plugin) entsprechend den Bauteil-Daten bzw. Informationen (offline) program-

C Konstruktive Details (Bauphysik)

## C 1 Zweischaliges Verblendmauerwerk

Birger Gigla

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>171</b>
<b>2</b>	<b>Grundsätzliche technische Regeln und Stand der Baupraxis</b>	<b>172</b>
2.1	Zweischaliges Verblendmauerwerk	172
2.2	Tragende Innenschale	174
2.3	Verblendschale	174
2.4	Schalenzwischenraum	178
<b>3</b>	<b>Dauerhaftigkeit der Verblendschale</b>	<b>180</b>
<b>4</b>	<b>Energiesparender Wärmeschutz</b>	<b>181</b>
<b>5</b>	<b>Eindringen von Feuchte durch Schlagregen</b>	<b>181</b>
<b>6</b>	<b>Hinweise zur Ausführung</b>	<b>188</b>
6.1	Mauersteine	188
6.2	Mörtel	189
6.3	Dehnungsfugen und Lüftungsöffnungen	191
6.4	Schalenzwischenraum: Abdichtung	191
6.5	Schalenzwischenraum: Kerndämmung und Drahtanker	193
6.6	Tragschale und Ablfangungen	194
6.7	Reinigung und Beschichtung der Verblendschale	195
6.8	Prozessoptimierungen bei der Herstellung von Verblendmauerwerk	195
6.9	Nachhaltigkeit	196
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>198</b>
	<b>Literatur</b>	<b>198</b>

## 1 Einführung

Dieser Beitrag beschreibt Verblendmauerwerk (Bild 1) als eine zweischalige Außenwandkonstruktion aus einer tragenden Innenschale und einer nichttragenden Außen- bzw. Verblendschale aus Sichtmauerwerk. Der Schalenzwischenraum wird mit Dämmstoffen bis auf einen für die Ausführung erforderlichen „Fingerspalt“ vollständig gefüllt. Diese Bauweise ist international in Regionen mit mäßig kalten und regenreichen Wintermonaten sowie regelmäßiger Schlagregenexposition üblich. Hierzu zählen die norddeutschen Küstenländer und die Küstenregionen der angrenzenden nordeuropäischen Länder sowie weltweit Küstenregionen von Industrieländern mit dem genannten Klima. Die Bauweise wird beschrieben in den Normen des Eurocode 6: DIN EN 1996-1-1 [38], DIN EN 1996-1-1/NA [39], DIN EN 1996-2 [42] sowie zusammenfassend in der Norm DIN EN 1996-2/NA [43], Anhang NA.D. National war sie vorangehend in der Norm DIN 1053-1 [35] „Mauerwerk Teil 1: Berechnung und Ausführung“ geregelt. International kann die Außenschale auch zum Tragquerschnitt hinzugerechnet werden. Bei zweischaligen Außenwänden darf die Vorsatzschale in Deutschland statisch nicht angesetzt werden (DIN EN 1996-1-1/NA [39]).

Der Vorteil von Verblendmauerwerk liegt in einer hohen Funktionalität unter den genannten klimatischen Bedingungen sowie einer langen Lebensdauer bei geringen Unterhaltungskosten. Voraussetzung ist die handwerklich einwandfreie Herstellung. Die Bauweise prägt gemeinsam mit dem vorhandenen Sichtmauerwerk das Stadtbild vieler mittel- und nordeuropäischer Küstenstädte und nimmt in den entsprechenden Regionen einen bedeutenden städtebaulichen Wert ein.

Andere Außenwandsysteme weisen unter den genannten klimatischen Bedingungen in Abhängigkeit vom Mikroklima Nachteile auf. Holzfassaden oder außenseitige Wärmedämmverbundsysteme (DIN EN 13499 [59] und E DIN EN 17237 [70]) können sich



Bild 1. Verblendmauerwerk in der Struktur eines „Blockverbands“ mit Fertigstürzen (Foto: Gigla)



Bild 2. Dämmplatte mit aufgeklebten Klinker-Riemchen (Foto: Gigla)

durch Besiedlung von Mikroorganismen nach relativ kurzer Nutzungsdauer grünlich oder dunkel verfärbten (z. B. „Veralgung“ oder „Schwärzepilz“). Dieses Problem zieht insbesondere bei Geschoßwohnungsbauten Instandsetzungsaufwand nach sich. Kosten entstehen durch die erforderliche Gerüststellung, Reinigung, Grundierung und Neubeschichtung. Eine nachträgliche Reduzierung der Mikroorganismen, beispielsweise durch Algizide, ist nicht dauerhaft und kann in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen zu unerwünschten Nebenwirkungen oder zu Umweltbeeinträchtigungen führen. Wohnungsbaugesellschaften rechnen in den genannten Regionen mit 10-Jahres-Instandsetzungintervallen für die Beseitigung von Mikroorganismen auf Wärmedämmverbundsystemen. Die einsetzende Besiedlung durch Mikroorganismen kann infolge der visuellen Beeinträchtigung bereits nach kürzerer Zeit zu Beanstandungen der Mieter oder Eigentümer führen. Bei Verwendung von Wärmedämmverbundsystemen mit Deckschichten aus Klinker-Riemchen (Bild 2) kommt es erfahrungsgemäß weniger stark zur Beeinträchtigung durch Mikroorganismen. Die Dauerhaftigkeit dieser Außenwandsysteme hängt von mehreren Faktoren ab, u. a. der Formbeständigkeit der Dämmplatten und den Eigenschaften des Befestigungsmörtels, und ist noch nicht systematisch nachgewiesen. Außenseitige Wärmedämmverbundsysteme setzen außerdem eine sorgfältige Planung bei der Befestigung von Regenfallrohren, Beschattungssystemen und anderen nichttragenden Außenbauteilen voraus, da diese Bauteile im Regelfall nur unter Mehraufwand befestigt werden können. Fassaden aus Verblendmauerwerk sind außerdem erfahrungsgemäß weniger anfällig für Vandalismus, z. B. Graffiti, als gleichförmige Oberflächen.

Auch bei Verblendmauerwerk kann es jedoch infolge nicht sachgerechter bzw. nicht optimaler Planung oder Ausführung zu Beeinträchtigungen kommen. In manchen Fällen liegen komplizierte Wirkungsgefüge vor, die bereits im Vorfeld von mehreren Gutachtern und

Sachverständigen unterschiedlich bewertet wurden. Das Ziel dieses Beitrags ist es, Hinweise zur möglichst dauerhaft-beeinträchtigungsfreien und in diesem Sinne nachhaltigen Ausführung von Verblendmauerwerk vorzustellen. Die grundsätzlichen technischen Regeln zur Planung und Ausführung von Verblendmauerwerk werden hierbei unter Berücksichtigung des Stands der Baupraxis in Norddeutschland zusammengefasst.

Schäden und Beeinträchtigungen an Verblendmauerwerk sind ein interdisziplinäres Problem, an dem Architekten, Bauingenieure, Bauchemiker, Bauphysiker, Mineralogen und Baubiologen zusammenarbeiten. Dieser Beitrag geht insbesondere aus objektplanerischer und tragwerksplanerischer Sicht [1] auf die beeinträchtigungsfreie Konstruktion von Verblendmauerwerk ein.

## 2 Grundsätzliche technische Regeln und Stand der Baupraxis

### 2.1 Zweischaliges Verblendmauerwerk

Zweischaliges Verblendmauerwerk – im Folgenden kurz als Verblendmauerwerk bezeichnet – besteht aus einer tragenden Innenwand („Innenschale“ bzw. „Tragschale“) und einer nichttragenden Außenwand („Verblendschale“ bzw. „Vorsatzschale“). Zur Tragwirkung zweischaliger Außenwände gibt es unterschiedliche Auffassungen zwischen der europäischen und der nationalen Normung. Nach europäischer Sichtweise wird bei einer zweischaligen Wand mit Zwischenraum eine Tragwirkung beider Schalen nicht grundsätzlich ausgeschlossen, wobei jede Wandschale getrennt für sich nachgewiesen werden sollte (DIN EN 1996-1-1 [38]). Nach nationaler Auffassung darf bei zweischaligen Außenwänden die Vorsatzschale grundsätzlich statisch nicht angesetzt werden (DIN EN 1996-1-1/NA [39]).

Dieser Beitrag folgt dem nationalen Stand, der im Abschnitt NA.D der Norm DIN EN 1996-2/NA [43] zusammengefasst wird. Bei der Bemessung von Verblendmauerwerk wird nur die Wanddicke der tragenden Innenwand angenommen. Beide Schalen werden auf einem gemeinsamen Fundament gegründet (s. Bilder 3 und 4). Zur Aufnahme von Winddruck und -soglasen auf die Verblendschale sind die beiden Schalen durch Luftschichtanker bzw. „Drahtanker“ aus nichtrostendem Stahl miteinander zu verbinden. Die im Nationalen Anhang der europäischen Norm DIN EN 1996-2 [42] geregelte Form der Drahtanker entspricht dem Stand der Norm DIN 1053-1 [35] (s. Bild 10). Aktuell werden Maueranker in DIN EN 845-1 [28] geregelt.



**Bild 3.** Kellergeschoß im Rohbau. Rechts auf der Baugrubensohle ist der Rand der Bodenplatte mit wärmedämmender Kimschicht sichtbar. Am Wandkopf der Kelleraußenwand – unterhalb der Elementplatten – ist ein der späteren Geländeoberkante angepasster Rücksprung von 36,5 cm auf 17,5 cm Wandstärke zur Auflagerung der Verblendschale zu erkennen. Das Kelleraußenmauerwerk besteht aus Kalksand-Panelen mit den Abmessungen 498 mm × 498 mm (L × H). (Foto: Gigla)



**Bild 4.** Gründung der Verblendschale, Sockeldetail. Ganz oben eine Perimeterdämmung. Das Kelleraußenmauerwerk ist mit Bitumen-Dachdichtungsbahnen abgedichtet. Auf dem Rückprung am Wandkopf des Kelleraußenmauerwerks unterhalb der Verblendschale sind Wärmedämmelemente aus geschäumtem Glas mit geschlossenzelliger Struktur und eine Höhenausgleichsschicht aus Kalksandsteinen angeordnet. Die Dichtungsebene wird unter dem Wärmedämmelement zur Tragschale geführt und ist hinter der Verblendschale zu erkennen. Die spätere Geländeoberkante liegt ungefähr auf Höhe der obersten fertiggestellten Lage der Verblendschale. (Foto: Gigla)

**Tabelle 1.** Bauprodukte im zweischaligen Verblendmauerwerk

Tragschale	Schalenzwischenraum	Verblendschale
Mauersteine	Wärmedämmung	Mauerziegel oder Kalksandsteine
Mauermörtel	Maueranker	Mauermörtel
Ringanker und -balken	Abdichtungsfolien	(Verfugmörtel)
Unterzüge oder Stürze		Verblendstürze
Auflagerkonsolen		Feuchtesperrschicht
Balkenauflager		Dichtungsbänder
Schubanker		Reinigungsmittel
Zugbänder		
Feuchtesperrschicht		
(ggf. Holzständerwerk, Stahlbetontragwerk u. a.)		

Weitere Parameter zur Anwendung der Draht- bzw. Luftsichtankern, z. B. maximaler lichter Abstand der beiden Wände bzw. „Schalen“ oder Mörtelanforderungen: Normalmauermörtel der Gruppe IIa (DIN 18580 [84]) bzw. Mörtelklasse M5 (DIN EN 998-2 [31] und DIN 20000-412 [88]), werden in DIN EN 1996-2/NA [43] zusammengefasst. Hier finden sich auch die Regelungen zur erforderlichen Ankeranzahl und zum Ankerabstand.

Alternativ zu den im Eurocode 6 geregelten Drahtankern werden heute vorwiegend Maueranker auf Grundlage von DIN EN 845-1 [28] aus nichtrostendem Stahl (DIN EN 10088 [51, 52]) verwendet. Ursache hierfür sind die steigenden Anforderungen an die Dämmschichtdicke mit einem erforderlichen Schalenzwischenraum von mindestens 180 mm. Eine zusätzliche Rolle spielt die Verwendung von Bauprodukten bei der Erstellung der Tragschale, z. B. bei der Verankerung von Stürzen (DIN EN 845-2 [29]).

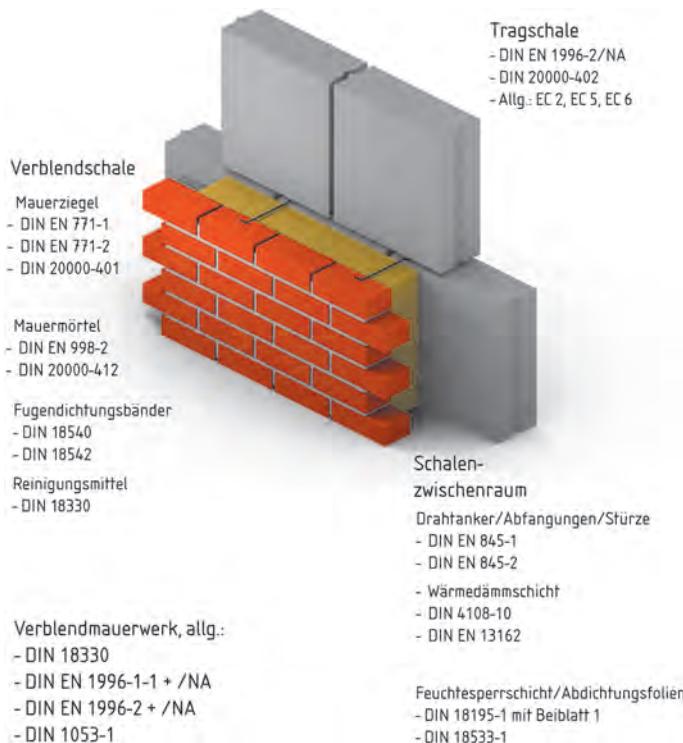
Die Zugtragfähigkeit von Luftsichtankern wird heute nach den Prüfverfahren für Ergänzungsbauten für Mauerwerk festgestellt (DIN EN 846-5 [30]). Grundsätzlich liegt die Anforderung aus der Norm DIN 1053-1 [35] zugrunde, nach der andere Verankerrungsarten der Drahtanker zulässig sind, wenn durch Prüfzeugnis nachgewiesen wird, dass diese Verankerrungsart eine Zug- und Druckkraft von mindestens 1 kN bei 1,0 mm Schlupf je Drahtanker aufnehmen kann. Aktuell wird die Zug- und Drucktragfähigkeit von Mauerankern nach der „Steinpaar-Prüfung“ (DIN EN 846-5 [30]) bestimmt. Hierbei sind mindestens zehn Steinpaar-Probekörper für die Druck- und Zugprüfung herzustellen, in denen die Maueranker bis zur festgelegten Mindestverankerungslänge eingebettet sind. Als Tragfähigkeit gilt der kleinere Wert aus Höchstlast oder Last bei einer lastseitigen Verschie-

bung um 5 mm. Ein Schlupf von 5 mm ist als relativ hoch zur Charakterisierung der Tragfähigkeit anzusehen, es handelt sich um eine geringe Anforderung. Zur Auswahl von Luftsichtankern für Bereiche mit hoher Windlast sollten die zugrundeliegenden Last-Verschiebungs-Kurven tragwerksplanerisch geprüft werden. Bei [2] finden sich Hinweise zur Präzisierung der Anforderung an die aufzunehmenden Zug- und Druckkräfte.

DIN EN 1996-2 [42] weist im Abschnitt „Formänderungen im Mauerwerk“ darauf hin, dass die Drahtanker in der Lage sein sollten, Bewegungen zwischen Verblendschale und Tragschale aufzunehmen, um die Gebrauchstauglichkeit des Mauerwerks nicht einzuschränken. Beispielsweise dürfen sich thermische Formänderungen auf die Gebrauchstauglichkeit der Verblendschale nicht ungünstig auswirken (ausreichende Biegeleichtigkeit der Anker).

Im Schalenzwischenraum wird die Wärmedämmung angeordnet, wobei Wärmedämmstoffe des Anwendungstyps WZ nach DIN 4108-10 [48] zu verwenden sind (DIN EN 1996-2/NA [43]). Üblicherweise wird geeignete Mineralwolle (DIN EN 13162 [56]) als Kernwärmestrahlung verwendet. Die Verblendschale ist über Öffnungen und in bestimmten in den Normen geregelten Höhenabständen statisch abzufangen und an der Tragschale oder den Deckensystemen zu befestigen. Aufgrund der Vielzahl der enthaltenen Bauprodukte handelt es sich beim Verblendmauerwerk um eine komplexe Bauweise. Tabelle 1 und Bild 5 geben einen Überblick über die beteiligten Komponenten.

Bei der Außenwand-Planung ist das Baurichtmaß (DIN 4172 [50]) auf die Tragschale anzuwenden. Die Verblendschale wird unter Berücksichtigung der Fenster- und Türenanschläge maßlich angepasst.



**Bild 5.** Schematische Darstellung der im Verblendmauerwerk vorhandenen Bauprodukte

## 2.2 Tragende Innenschale

Für die tragende Innenschale werden alle geregelten Wandbaustoffe verwendet. Unter Beachtung der konstruktiven Grundsätze ist auch die Holzständerbauweise möglich, die im Zuge von Ansprüchen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden zunehmendes Interesse gewinnt. Die Auswahl des Wandbaustoffs erfolgt in Abhängigkeit von den Entwurfszielen. Maßgebend sind nachhaltiges Bauen, Baukosten, architektonische Aspekte sowie die Eigenschaften: Tragfähigkeit, Schallschutz, Brandschutz und sparsamer Einsatz von Energie in Gebäuden.

Zu beachten ist weiterhin die Verankerung der Verblendschale. In der Baupraxis in Norddeutschland werden bislang für die Tragschale massive Baustoffe mit Innenputz bevorzugt. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit werden in vielen Fällen großformatige Plansteine bzw. -elemente (DIN 20000-402 [87]) mit geeigneten Dünnbettmörteln eingesetzt. Die Plansteine der Tragschale sind zumeist mit Nut- und Feder-systemen ausgestattet und werden „knirsch“, d. h. ohne Vermörtelung der Stoßfugen versetzt. Im Mehrgeschosswohnungsbau und bei größeren Einfamilienhäusern wird die Tragschale in Norddeutschland häufig als Einsteinmauerwerk aus Kalksand-Planelementen errichtet (DIN EN 1996-3 und /NA [44, 45]).

## 2.3 Verblendschale

Die Verblendschale ist in Deutschland grundsätzlich nichttragend und trägt ausschließlich ihre Eigenlasten ab. Die Norm DIN EN 1996-2/NA [43] fasst die Regelungen zu den Höhenabständen, in denen die Verblendschale zur Begrenzung ihrer Schlankheit abzufangen ist, zusammen. In Abhängigkeit von der Dicke der Verblendschale und der handwerklichen Ausführung des Mauerwerks sind gewisse Auflagerexzentrizitäten zulässig. Zur Abfangung der Verblendschale über Öffnungen werden Auflagerkonsolen oder Verblendstürze (Bild 6) verwendet. Beide Abfangungsarten werden an der Tragkonstruktion verankert, im Regelfall an den Stahlbetondecken und -überzügen, sofern zulässig und statisch möglich auch an der Tragschale selbst.

Anforderungen an vorgefertigte Stürze als Ergänzungsbauenteile für Mauerwerk regelt DIN EN 845-2 [29]. Die Stützweite vorgefertigter Stürze ist dabei auf 4,5 m begrenzt. Längere Betonstürze sind auf Grundlage von DIN EN 13225 [58] zu bemessen. Nichtstabförmige Bauteile (z. B. größere T-förmige Betonfertigteile) sind tragwerksplanerisch gesondert zu behandeln. Dieses betrifft auch die Auflagerung, bei der die Verwendung von Auflagern und Konsolen nach DIN EN 845-1 [28] sachgerecht zu überprüfen ist.

Die erforderlichen tragwerksplanerischen Nachweise für die Verblendschale selbst beschränken sich häufig auf die Abfangungen und auf die Auflagerpressungen



**Bild 6.** Verblendstürze, hier über Eck geführt und an einem Stahlbetonüberzug verankert (Foto: Gigla)

bei Exzentrizitäten sowie ggf. auf die Verträglichkeit von Temperaturdehnungen. Die Befestigung von statisch nicht nachzuweisenden Bauteilen, beispielsweise Regenfallrohre oder Beleuchtung, ist üblicherweise unkritisch. Nebenbauteile, die äußere Einwirkungen wie Windlasten oder andere Nutzlasten aufnehmen, z. B. Verschattungseinrichtungen, Schutzdächer oder Geländer, sind gesondert nachzuweisen oder an der Tragschale zu verankern.

Bei Planung und Ausführung der Verblendschale sind überwiegend architektonische Zielvorstellungen maßgebend. Im Vordergrund stehen Farbe und Struktur der Ziegel und des Mörtels sowie die gewählte Verbandsstruktur. Die Stärke der Verblendschale entspricht im Regelfall der Steinbreite von 11,5 cm des Normalformats (DIN 105-4 [22]). In manchen Fällen kommen auch abweichende Steinformate mit 10,5 cm oder 11 cm Breite zum Einsatz, z. B. das *Oldenburger Format* mit ca. 220 mm × 105 mm × 52 mm (L × B × H). Die Mindestdicke der Verblendschale beträgt 90 mm. Dünnerne Außenschalen sind Bekleidungen, deren Ausführung in DIN 18515 [77, 78] geregelt ist (DIN EN 1996-2/NA [43]). Sollen aus architektonischen Gründen sehr kleine Steinformate verwendet werden, z. B. ca. 180 mm × 80 mm × 50 mm (L × B × H), ist die Standsicherheit der Verblendschale gesondert nachzuweisen und sicherzustellen. Die Außenschale muss in der Regel über ihre ganze Länge und vollflächig aufgelagert sein. Bei unterbrochener Auflagerung (z. B. auf Konsolen) müssen in der Absfangebene alle Steine beidseitig aufgelagert sein.

Da keine echten Binder vorhanden sind, ist der Begriff „Verband“ eigentlich irreführend. Häufig wird eine unregelmäßige und nicht im Detail geplante Struktur ausgeführt (Bild 7, sogenannter „wilder Verband“). Ge-



**Bild 7.** Verblendschale im sog. „wilden Verband“, nachverfugt. In der Steinreihe oberhalb des Sockels ist hier infolge zeitweiliger starker Durchfeuchtung eine schwarze Verfärbung durch Mikroorganismen eingetreten. (Foto: Gigla)



**Bild 8.** Verblendschale im „Blockverband“, Fugenglattstrich. Oberhalb der Verblendschale im Stützenbereich ist eine horizontale Dehnungsfuge erforderlich. Die Ausführung von Rücksprüngen – wie hier im Bereich des Eckpfeilers – setzt eine sorgfältige Planung im Hinblick auf den energiesparenden Wärmeschutz voraus. (Foto: Gigla)

stalterisch höherwertig, aber auch aufwändiger in Planung und Ausführung, sind regelmäßige Strukturen, z. B. in Anlehnung an den Blockverband (Bild 8). Eine Ausführung gemäß Bild 8 setzt eine steingerechte Werkplanung auch für die Verblendstürze voraus. Als Steine werden für die Verblendschale im Regelfall Mauerziegel zur Verwendung in ungeschütztem Mauerwerk, sogenannte „U-Ziegel“ („unprotected“) verwendet, z. B. Klinker oder Vormauerziegel. Seltener kommen dauerhafte Kalksandsteine mit deklariertem Frostwiderstand zum Einsatz (DIN EN 771-2 [24] und DIN EN 772-18 [26]). Für U-Ziegel gelten auf Grundlage von DIN EN 771-1 [23] unter anderem Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften sowie an Frostwiderstand und den Gehalt an akti-

**Tabelle 2.** Zusammensetzung und Mischungsverhältnisse für Normalmauermörtel in Raumteilen nach DIN 18580. Die Zuordnung zwischen bisheriger Mörtelgruppe (DIN 1053-1) und Mörtelklasse gilt auch nach DIN 20000-412, wenn ein Nachweis über die Erfüllung der Anforderungen an die Fugendruckfestigkeit (DIN 18555-9) [83] vorliegt.

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8
Zeile	Mörtelgruppe MG	Mörtelklasse nach DIN EN 998-2	Luftkalk		Hydraulischer Kalk (HL2)	Hydraulischer Kalk (HL5), Putz- und Mauerbinder (MC5)	Zement	Sand <sup>1)</sup> aus natürlichem Gestein
			Kalkteig	Kalkhydrat				
1	I	M 1	1	–	–	–	–	4
2			–	1	–	–	–	3
3			–	–	1	–	–	3
4			–	–	–	1	–	4,5
5	II	M 2,5	1,5	–	–	–	1	8
6			–	2	–	–	1	8
7			–	–	2	–	1	8
8			–	–	–	1	–	3
9	IIa	M 5	–	1	–	–	1	6
10			–	–	–	2	1	8
11	III	M 10	–	–	–	–	1	4

1) Die Werte des Sandanteils beziehen sich auf den lagerfeuchten Zustand.

ven Salzen. DIN 20000-401 [86] regelt die Verwendung der Angaben aus der CE-Kennzeichnung der Ziegel in Bezug auf die technischen Regeln für die Planung, Bemessung und Konstruktion von baulichen Anlagen und ihren Teilen. Hierbei ist zu beachten, dass bei der CE-Kennzeichnung z. B. die mittlere Druckfestigkeit des Steins (DIN EN 771-1 [23]) deklariert wird, die nicht mit der Steindruckfestigkeitsklasse (DIN EN 1996-1-1/NA [39] bzw. DIN EN 1996-3/NA [45]) verwechselt werden darf. Das äußere Erscheinungsbild von Mauerziegeln hängt von den Ausgangsstoffen, der Formgebung und dem Brennvorgang ab. Bei handwerklich geprägter Herstellung und traditioneller Brenntechnik – z. B. in einem Ringofen – weisen Mauerziegel aus natürlichem Ton eine individuelle Struktur auf. Nach sorgfältiger Sortierung lassen sich gestalterisch anspruchsvolle Verblendschalen herstellen, detaillierte Hinweise gibt [3]. Traditionell hergestellte Mauerziegel sind relativ teuer und werden bevorzugt bei repräsentativen Immobilien eingesetzt. Zunehmend wird auch im niedrigpreisigen Marktsegment eine individuelle Struktur der Mauerziegel gewünscht. Preisgünstigere Verblendsteine können auch aus industriell gefertigten, gleichartigen Rohlingen marktgerecht gestaltet werden. Hierzu eingesetzt werden u. a. einfärbende Zusätze in der Tonmasse (Pigmente), zusätzlich aufgebrachte Tonschlämme (Engobieren), Matrizen bei der Formgebung oder mechanischer Abrieb nach dem Brennen. Bei der Herstellung der Verblendschale kommt ein Mauermörtel für die Verblendschale und in beson-

deren Fällen ein zusätzlicher Mauermörtel für das nachträgliche Verfügen der Verblendschale zum Einsatz. Entsprechend den aktuellen Bestimmungen für die Ausführung von zweischaligem Mauerwerk (DIN EN 1996-2, Anhang NA.D.1 [43]) ist bei der Verwendung von Drahtkern grundsätzlich Normalmauermörtel mindestens der Gruppe IIa zu verwenden. Hierbei handelt es sich gemäß Rezeptur um einen Kalkzementmörtel (DIN 18580 [84]).

Traditionell wurden im zweischaligen Mauerwerk zum Vermauern der Lager- und Stoßfugen der Verblendschale ausschließlich Normalmörtel der Mörtelgruppen II und IIa verwendet (DIN 1053-1 [35], Abschnitt 5.2.3.2), vgl. Tabelle 2. Hintergrund ist, dass Kalkzementmörtel weniger steif sind als reine Zementmörtel und die Rissgefahr bei Dehnungen infolge von Temperaturänderungen oder Auflagerverschiebungen geringer ist. Reine Zementmörtel der Mörtelgruppen III und IIIa (DIN 18580 [84], Mörtelklasse M 10) führen als Mauermörtel infolge ihres höheren E-Moduls erfahrungsgemäß häufiger zu Rissen bei Temperaturdehnungen oder äußeren Verformungen und dürfen nur zum nachträglichen Verfügen verwendet werden. Kalkmörtel der Mörtelgruppe I ermöglichen keinen ausreichend zügigen Arbeitsfortschritt. Der früheren nationalen Bezeichnung Mörtelgruppe IIa (DIN 1053-1 [35]) entspricht heute die Mörtelklasse M 5 (DIN EN 998-2 [31], DIN 20000-412 [88] und DIN 18580 [84]). Die Rezeptur wird nur in DIN 18580 geregelt (Tabelle 2).

D Mauerwerk im Bestand

**D 2 Planung, Durchführung und Auswertung von  
Belastungsfahrten auf Eisenbahngewölbebrücken**

Conrad Pelka, Gregor Stolarski, Thomas Niedermeyer,  
Gunter Hahn, Christian Hesse, Steffen Marx und Jenny Keßler

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>221</b>
<b>2</b>	<b>Entstehungsgeschichte der EÜ Seybothenreuth</b>	<b>222</b>
<b>3</b>	<b>Bestand und Zustand der EÜ Seybothenreuth</b>	<b>224</b>
3.1	Auswertung der Regelinspektionen – Erkennung einer Schadensentwicklung	224
3.2	Untersuchung des Bauwerks	224
3.3	Untersuchungsplanung an der EÜ Seybothenreuth	226
3.4	Vorläufige Auswertung und Einschätzung nach Diagnostik	227
3.5	Planung der Sanierungsmaßnahmen	229
<b>4</b>	<b>Erste statische und geotechnische Betrachtung</b>	<b>231</b>
4.1	Vereinfachte 2D-FE-Simulation	231
4.2	Geotechnische Berechnungen auf Grundlage der 1. Erkundungsphase	232
4.2.1	Erkundungsprogramm der 1. EKP (2018)	232
4.2.2	Geotechnische Berechnung auf Grundlage der 1. EKP (2018)	234
4.3	Ergänzende 3D-FE-Betrachtungen für Boden und Bauwerk	234
<b>5</b>	<b>Ableitung der Belastungsfahrt</b>	<b>238</b>
5.1	Planung für eine Lok-Belastungsfahrt	238
5.1.1	Lasten & Laststellungen	239
5.1.2	Messtechnik	241
5.2	Durchführung	245
5.2.1	Messung	245
5.2.2	Messwerterfassung	246
5.3	Messwertaufbereitung/Messwertzuordnung	246
5.3.1	Aufbereitung/Zuordnung der mechanischen Messwerte	246
5.3.2	Vergleich beider Messsysteme	247
<b>6</b>	<b>Auswertung der Belastungsfahrt</b>	<b>247</b>
6.1	Vergleich beider Messsysteme	247
6.2	Ermittlung repräsentativer Messwerte	248
<b>7</b>	<b>Ergänzende geotechnische Untersuchungen</b>	<b>249</b>
7.1	Veranlassung	249
7.2	Erkundungsprogramm des 2. EKP (2022), BG 2 (2023)	249
7.2.1	Aufschlussarbeiten	249
7.2.2	Geologische Schichteinheiten und Baugrundbeschreibung	251
7.2.3	Geomechanische Kenngrößen (BG2 2023)	254
7.3	Ergänzende geotechnische Nachweisführung	257
7.4	Vergleich der FE-Modellierungen mit den in den Setzungsberechnung verwendeten Eingangsgrößen (Bericht 1+2)	260
7.5	Vergleich Belastungsfahrt mit den Setzungsberechnungen (nach DIN 4019)	264
<b>8</b>	<b>Messwertgestützte statische Nachweisführung</b>	<b>265</b>
8.1	Durchführung der statischen Berechnung mit kalibriertem 3D-FE-Modell	265
8.2	Ergebnisse und Auswertung	266
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>268</b>
	<b>Literatur</b>	<b>269</b>

## 1 Einleitung

Gewölbebrücken sind gekennzeichnet durch ihre massive Bauweise und Langlebigkeit. Die ältesten erhaltenen und teils noch genutzten Brückenbauwerke wurden vor über 2000 Jahren durch die Römer errichtet. Sie sind durch ihre einfache Bauweise und hohe Resttragfähigkeit populär geworden. Als Vergleich ist die Ponte Fabricius (62 v. Chr.) zu nennen, die den Tiber als Fußgängerbrücke in Rom überquert [1].

Gewölbebrücken für den Eisenbahnverkehr, die ab ca. 1830 in Deutschland errichtet wurden, unterliegen differenzierten Einwirkungen bzw. veränderten Randbedingungen gegenüber den Brücken des damaligen Römischen Reichs. In Abhängigkeit von dem aufkommenden Schienenverkehr entscheiden nicht nur die Bedingungen aus Bauform, Baustoff, geographischer Lage, Witterungseinflüsse (z. B. Frost-Tau-Wechsel), Extremwetterlagen (z. B. Erdbeben, Starkregen, Hochwasser) oder politische Ziele über eine verlängerte bzw. verkürzte Nutzungszeit, sondern auch über die Jahre sich verändernde Belastungsgrößen, die gestiegenen Belastungsfrequenzen (Taktung) und die häufig dem zeitlichen Verlauf nicht angeglichenen Instandsetzungsmaßnahmen.

Der Brückenbestand von historischen Eisenbahnbrücken ist u. a. durch die politischen Vorgaben der Bahnreform 1994 im Zuge der Aufwendungen für den Brückenerhalt drastisch reduziert worden. Erhaltungsmaßnahmen wurden ab diesem Zeitpunkt nur noch bedingt verfolgt. Zugunsten einer schnelleren Realisierung eines modernen Streckennetzes durch komplett Ersatzneubauten wurden Zuwendungen von Bund und Land bereitgestellt. Zu diesem Zeitpunkt hatten viele der ca. 5926 Gewölbebrücken [2] zum Teil ihre technische Nutzungsdauer erreicht und hätten eine vollumfängliche Generalsanierung benötigt.

Der Rückgang der Gewölbebrücken lässt sich auch in einem Beobachtungszeitraum von 2015 bis 2019 in Zahlen ausdrücken. Von den zu diesem Zeitpunkt ca. 226 im betrachteten Netzabschnitt der Deutschen Bahn befindlichen Eisenbahngewölbebrücken wurden nur 26 mit Maßnahmen über eine Teilerneuerung mit Ausbildung einer Fahrbahplatte auf dem Gewölberücken erhalten. Weitere 30 Bestandsgewölbe wurden mit einer Tragwerk-im-Tragwerk-Methode, z. B. mit einer Innentragschale, ausgestattet. Hierbei gibt die historische Gewölbestruktur nahezu ihre gesamte Tragfähigkeit an die neue Tragschale ab. Die restlichen 170 Gewölbe mussten modernen Tragwerken wie z. B. Rahmenbrücken, integralen und semi-integralen Brücken sowie Netzwerk- oder Hybridbrücken weichen. Diese hohe Rückläufigkeit von historischen Bestandsbrücken gilt es zu minimieren, sofern es die betrieblichen und projektspezifischen Anforderungen zulassen.

Mit der Errichtung von Fahrbahnpflattensystemen im sächsischen Raum [3] in den Jahren von 1932 bis 1990 wurde aufgezeigt, dass eine erhebliche Nutzungszeitverlängerung der Gewölbebrücken erreicht werden



**Bild 1.** Die Eisenbahnüberführung Seybothenreuth auf der Strecke 5051 von Weiden nach Bayreuth im Bahnkilometer 45,235

kann. Des Weiteren trägt eine Ermittlung des inneren Gefüges der Bauwerkssubstanz zu einem besseren Verständnis über das Zusammenwirken von Baustoffparametern im statischen System bei [4, 5]. Der äußere, oft recht schlechte optische Eindruck in den Bauwerksteilen der alten Tragwerke kann schnell zu einer falschen Beurteilung und damit zu einem vermeidbaren Rückbau führen.

Hierbei sollen Belastungsfahrten für die statische Beurteilung die Entscheidungsfindung zur Kalibrierung bzw. zum Abgleich der erforderlichen Werte für den äußeren und inneren Standsicherheitsnachweis unterstützen. In der Vergangenheit konnten vorgelagerte, vereinfachte statische Nachrechnungen im Zuge der RIL 805 [6] in vielen Fällen die erforderlichen Anforderungen aus dem Lastmodell 71 [7] bzw. aus zusätzlicher Lasterhöhung für das Tragwerk nicht erfüllen. Das Regelwerk der Deutschen Bahn hat in der Nachrechnungsrichtlinie aber noch weiterführende Möglichkeiten aufgezeigt, die zwar mit einem anfänglich planerisch höheren Aufwand verbunden sind, aber bei Erhalt des Tragwerks bis zu 2/3 der Kosten gegenüber einem Neubau einsparen können.

Genau dieser planerische Gedanke wird bei der hier gezeigten Gewölbebrücke EÜ Seybothenreuth aus dem Jahre 1861 (s. Bild 1) auf der Strecke 5051 zwischen Weiden und Bayreuth im Bahnkilometer 45,235 verfolgt. Anhand von Belastungsfahrten mit zwei kalibrierten Dieselloks der DB-Baureihe V 100 konnten in definierten Laststellungen auf dem Brückentragwerk sowohl die Relativverformungen des Gewölbebogens als auch die Gesamtverformungen der Brückenstruktur gemessen werden. Über außenliegende Tachymetrie und den Vergleich mechanischer und lasergestützter Messungen konnte auch die Boden-Bauwerk-Interaktion ermittelt werden. Somit war es möglich, nicht nur die innere Tragfähigkeit des Gewölbes mit der Finite-Elemente(FE)-Simulation abzugleichen, sondern auch die äußere Standsicherheit mit den bodenmechanischen Modellen zu verifizieren.

Das in der Zustandskategorie 4 von 4 befindliche Bauwerk konnte so über die letzte Bewertungsstufe nach RIL 805 mit der Methodik der messwertgestützten statischen Nachweisführung in die Generalsanierung mit Erhalt einer Fahrbahnplattenausbildung in die Weiternutzung im Netz der Deutschen Bahn überführt werden [8]. Durch ergänzende Gefügeverbesserungsmaßnahmen im Bestandstragwerk besteht die Möglichkeit, dass das 161 Jahre alte Tragwerk noch weitere 50 Jahre den Bahnbetrieb auf der Strecke von Weiden nach Bayreuth aufrechterhalten kann.

## 2 Entstehungsgeschichte der EÜ Seybothenreuth

Die knapp 50 km lange Strecke Weiden – Bayreuth wurde in der Zeit zwischen Januar 1861 und Dezember 1862 durch die Königlich Privilegierte Gesellschaft der Ostbahnen erbaut. Sie gehörte zu einem damals sehr umfangreichen Vorhaben des Ausbaus der ostbayerischen Eisenbahnen, die in der Folge eine Anbindung bis nach Hof im Norden Bayerns erhielten. Die Bogenbrücke in Seybothenreuth steht in km 45,235 der Strecke. Sie gehört zu den ältesten noch in Betrieb befindlichen Eisenbahnbrücken in Bayern [9].

Der Sandsteinhauptbogen hat eine lichte Weite von ca. 10,80 m und der Bogenstich hat eine Höhe von 2,10 m. Mit diesem Verhältnis aus Bogenstich zu lichter Weite beschreibt das Gewölbe einen sehr flachen Bogen. Bezogen auf die topographischen Verhältnisse der Region und auf die Einhaltung der Gradienten der Streckenführung konnten nur flache Stich-Höhen-Verhältnisse ausgebildet werden, daher liegt die Überdeckungshöhe auch hier nur bei ca. 0,65 m zwischen Gewölberücken und Schienenoberkante. Die aufgehenden Widerlagerwände haben eine Höhe von ca. 5,0 m. Die Gesamtlänge der Brücke beträgt ca. 9,0 m. Es entsteht so eine Gesamtfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> Brückenfläche.

Die Brücke bzw. die damals noch sehr junge Eisenbahnlinie finden historisch im Zusammenhang mit einer Schlacht zwischen preußischen und bayerischen Truppen im Juli 1866 Erwähnung. Als ein Denkmal qualifiziert, erfordert sie bei der Instandhaltung besonders sorgfältige Sanierungsverfahren, bei denen dennoch auf die betrieblichen Anforderungen der Bahn umfassend eingegangen werden muss. Die einbogige Brücke wurde aus regionalem Sandstein hergestellt und damit aus einem Material, dessen äußere Schalen mit der Zeit zunehmend anfällig für Witterungseinflüsse und Alterung sind [10].

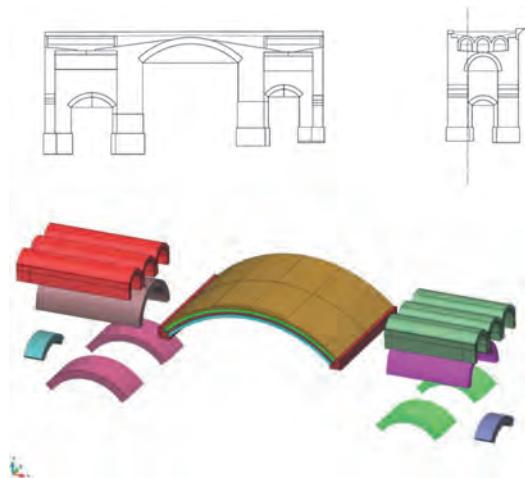
Diese Prozesse ließen nach dem bereits sehr langen Betrieb auf der Brücke eine auffällige Patina entstehen (s. Bild 2). Die Verkrustungen auf dem Sandstein verändern sich zudem in Bodennähe infolge der Einwirkungen von Frost und Taumitteln der Straße. Fränkische Sandsteine weisen in der Regel nur mäßige Frost- und Salzresistenz auf.

Die klar einsehbare, robuste Tragkonstruktion des Bauwerks besticht mit ihrer technisch ablesbaren Ästhetik und den gealterten Sichtmauerwerken.

Die Brücke liegt unweit südlich des Bahnhofs Seybothenreuth. Die Bahn überquert dort eine Ortsstraße, die ehemals eine viel frequentierte regionale Verbindung war und mittlerweile nur als Verbindung zur außerorts verlegten Bundesstraße fungiert. Am Widerlager Weiden wurde ein ehemals offen fließender Bach verrohrt. Die Höhe des Bauwerks resultiert aus der historisch geplanten Führung und Gradienten der Strecke. Die Bahntrasse geht südlich von Seybothenreuth in Dammlage über. Es folgt im Ortsabschnitt und bis zum Bahnhof die Führung des Gleises auf einer hohen Dammschüttung, die als Traverse gegen einen bahnrechts ansteigenden weitläufigen Hang erbaut wurde. Bedingt durch die hangige Geländelage und den Untergrund entwässert das Gelände links der Bahn auch über offene Gräben und Bäche. Einer dieser Bäche wurde durch die Brückenöffnung geführt. Die bindigen Hangböden, die Geländeneigung und die anfallen-



Bild 2. Patinabildung im aufgehenden Widerlagerbereich mit Abwitterungen unterhalb des Gewölbebogens



**Bild 3.** Bestandsplan der historischen Konstruktionen mit noch offenem Bachbett [11]

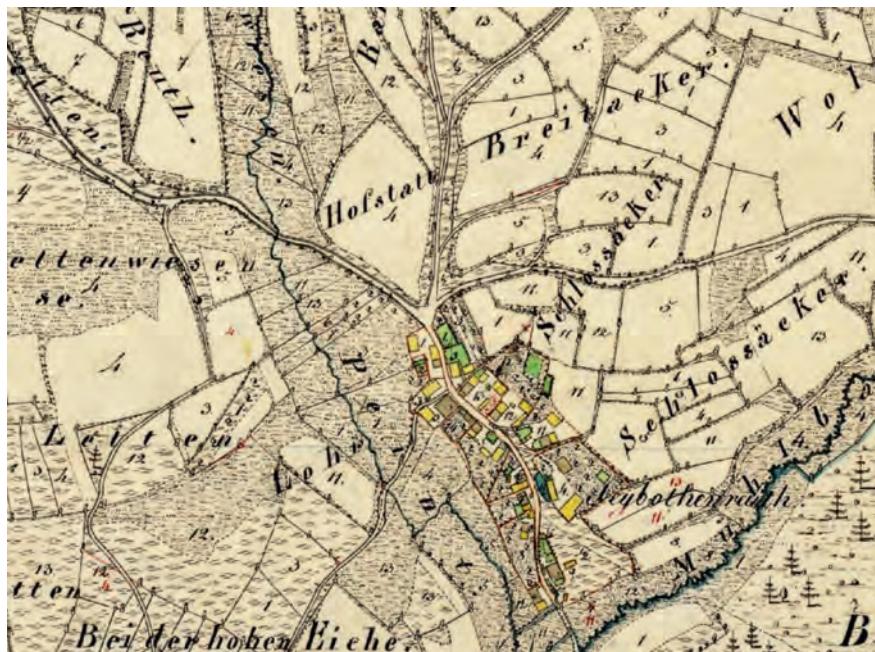
lende Feuchte stellten eine regional typische und nicht zu unterschätzende Herausforderung beim Bahnbau dar. Das hangseitig dem Bahndamm und damit auch dem Brückenwiderlager zufließende Sicker- und Oberflächenwasser verändert die Bodenfestigkeit. Im Bau, aber auch nachträglich im Betrieb der Strecke entstehende Setzungen könnten die Folge sein. Zudem verursachen die hohen Bahndämme eine setzungserzeugende Untergrundbelastung. Die Dammschüttung wirkt

in der Regel auf bereits erbaute Widerlagerfundamente (WLF) ein und verursacht über die Zeit sogenannte Mitnahmesetzungen.

Um das Bauwerk vor Folgen der außerplanmäßigen Verformungen zu schützen, errichteten die Erbauer der Brücke in Verlängerung der beiden Widerlager überwölbte Hohlkammern. Diese können als Spargewölbe (um Material einzusparen wurde der Gewölbebau auch in Bereichen von Pfeiler- bzw. Widerlagerstrukturen eingesetzt) angesehen werden. Die Spargewölbe wurden jeweils mit unterschiedlichen lichten Weiten und unterschiedlichen Stichhöhen ausgebildet, beschreiben aber einen identischen Bogenverlauf von  $f/l = 0,24$ . Es sind nicht nur die Spargewölbe in Längsrichtung im Bereich der Widerlager von Bedeutung; auch in Querrichtung liegen ähnliche kathedralische Gewölbestrukturen mit lichten Höhen von ca. 10,0 m vor, deutlich in Bild 3 zu sehen.

Sie wurden nur partiell und so weit aufgefüllt, wie die frei durch die nach außen vorhandenen kleinen Spargewölbebögen einrieselnden Bodenmassen hineingelangten.

Diese bereits optisch beeindruckend robust aus Sandstein mit Ziegelgewölbe erbauten Kammern verhinderten tatsächlich die Setzungen an den Widerlagerstirnen und damit die Verformungen des Gewölbes. Sie schirmten planmäßig den verformungsempfindlichen Mittelteil der Konstruktion ab. Die Kammern selbst aber wurden unter der Last aus den rückseitig angefüllten Dämmen verformt, sodass Risse im Bauwerk vorgefunden wurden. Den Fachplanern der aktuellen Sa-



**Bild 4.** Historischer Standort – Ortslage, wenige Jahre vor dem Bahnbau [12]



**Bild 5.** Standort des Bauwerks in Ortslage von Seybothenreuth [12]

nierung war es im Zuge der Voruntersuchungen möglich, auch das Innere der Kammern zu begehen. Diese sind sonst tief mit dem Böschungskegel der Widerlager überdeckt. Die Eindrücke der Dammöffnung können den Abschnitten 3.2 und 7.2 entnommen werden. Den historischen Ort Seybothenreuth und die aktuelle Lage des Bauwerks, wie er beim Bahnbau angetroffen wurde, zeigen Bilder 4 und 5. Die Darstellung des Bauwerksbestands in Bild 3 zeigt die Geometrie der Bogen- und Widerlagerkonstruktionen.

### 3 Bestand und Zustand der EÜ Seybothenreuth

#### 3.1 Auswertung der Regelinspektionen – Erkennung einer Schadensentwicklung

Im Ergebnis der wiederkehrenden Prüfungen des Bauwerks durch die DB InfraGO AG zeigten sich punktuell erhebliche und fortschreitende Mängel. Unter anderem wurden an der Gewölbebrücke in verschiedenen Bereichen folgende Schäden detektiert [13]

- Im *Gewölbebogen* gibt es stellenweise abgeschaltete, gerissene, hohlklingende und verwitterte Bereiche. Des Weiteren gibt es im Gewölbe einen durchgehenden Fugenriss zwischen Stirnring und Gewölbebogen. Im Bereich des geschädigten Mauerwerks treten Durchfeuchtungen auf. Wasser tropft so auf den darunterliegenden Gehweg, im Winter besteht die Gefahr der Glatteisbildung.
- In den aufgehenden Bauteilen der *Widerlager* sind ebenfalls vereinzelte Bereiche abgeschalt, flächig hohlklingend, gerissen und verwittert. Der o. g. durchgängige Riss zwischen Stirnring und Gewölbebogen zeichnet sich auch im Widerlager teilweise ab. Durch die genannten Schadensbilder im Widerlager ist auch in bestimmten Bereichen eine stellenweise Durchfeuchtung vorhanden.
- Die parallel zum Fahrweg stehende *Flügelwand* hat ebenfalls stellenweise abgeschaltete, hohlklingende, gerissene und verwitterte Mauerwerksbereiche. In manchen Bereichen sind auch Verformungen, Verschiebungen und Verkippungen erkennbar. Die Vorderansicht zeigt eine leichte Wölbung. Durchfeuch-

tungen haben sich vor allem in den Fußpunkten der Flügelwand im aufgehenden Bereich der Böschung durch eine Dunkelverfärbung abgezeichnet.

- Im Bereich der nachträglich aufgesetzten *Stirnwandergänzung* aus Stahlbeton gibt es vereinzelt Betonabplatzungen mit freiliegender Bewehrung. Im Übergangsbereich zwischen Brücke und freier Strecke ist die Schotterbegrenzungswand im Bereich der Kappe nach außen gedrückt. Im unteren Bereich der Stirnmauer aus Naturstein gibt es verwitterte, hohlklingende und vereinzelt ausgebrochene Steine.
- Durch rückstauende Feuchte auf dem Gewölberücken und im Bereich der Stirnwände kommt es zu Durchfeuchtungen des gesamten Mauerwerks. Frostperioden führen dazu, dass Teile des Mauerwerks abschalen und so zu einem Verkehrssicherheitsrisiko für die Teilnehmer des Straßenraums werden.
- Die Gehwegkappen im Bereich des Schutz- und Sicherheitsraums sowie einzelne Befestigungspunkte des Geländers sind ausgebrochen.

Aus Gründen der o. g. Mängel, die sich von der Verkehrssicherheit bis zur Standsicherheit auswirken, begann die Planung einer umfassenden Sanierung erst, nachdem in einem weiteren unabhängigen Gutachten die Möglichkeiten des Erhalts der Brücke geprüft und die denkmalpflegerischen Belange eingeflossen waren. Bei den technischen Auflagen zur Konstruktionsausbildung seitens der DB Netz AG muss das Bauwerk zudem eine hohe Dauerhaftigkeit aufweisen und besonderen neuzeitlichen sicherheitstechnischen Kriterien im Überbau genügen. Auf den bahnbetrieblichen Vorgaben, den Bauwerksberichten der DB und dem vorliegenden Begutachtungsstand zur gesamten Tragstruktur baut die umfangreiche Erneuerungsplanung auf.

#### 3.2 Untersuchung des Bauwerks

Vom Team „Mauerwerk“ wurden nachfolgende erweiterte Untersuchungen am Bauwerk durchgeführt. Neben der steingenauen Ermittlung der Oberflächenschäden und des aktuellen Zustands der Konstruktionen wurden Befahrungen des Gewölbes und der hohen Partien der Widerlager von einer Arbeitsbühne aus ausgeführt. Somit konnten vor allem die Stirnringrisse in der Bogenuntersicht kontrolliert werden. Die Gesimsauflagen und die Gesimssteine sowie der Bereich der künftigen Mauerkrone unter einer Fahrbauplatte konnten handnah und intensiv untersucht werden. Durch die Kernbohrungen in den Widerlagerstirnwänden konnten die Hohlkammern erstmalig per Kamera eingesehen werden. Nachfolgende Freilegung der Sparbögen an beiden Widerlagern ermöglichte eine direkte Begehung der Kammern und somit die direkte Erfassung des inneren Mauerwerkszustands. Zusätzlich konnte eine massive und in guter Mauerwerksqualität ausgeführte Anbindung der bahnparallelen Kammerwände an die Widerlagerstirn festgestellt werden. Damit lagen

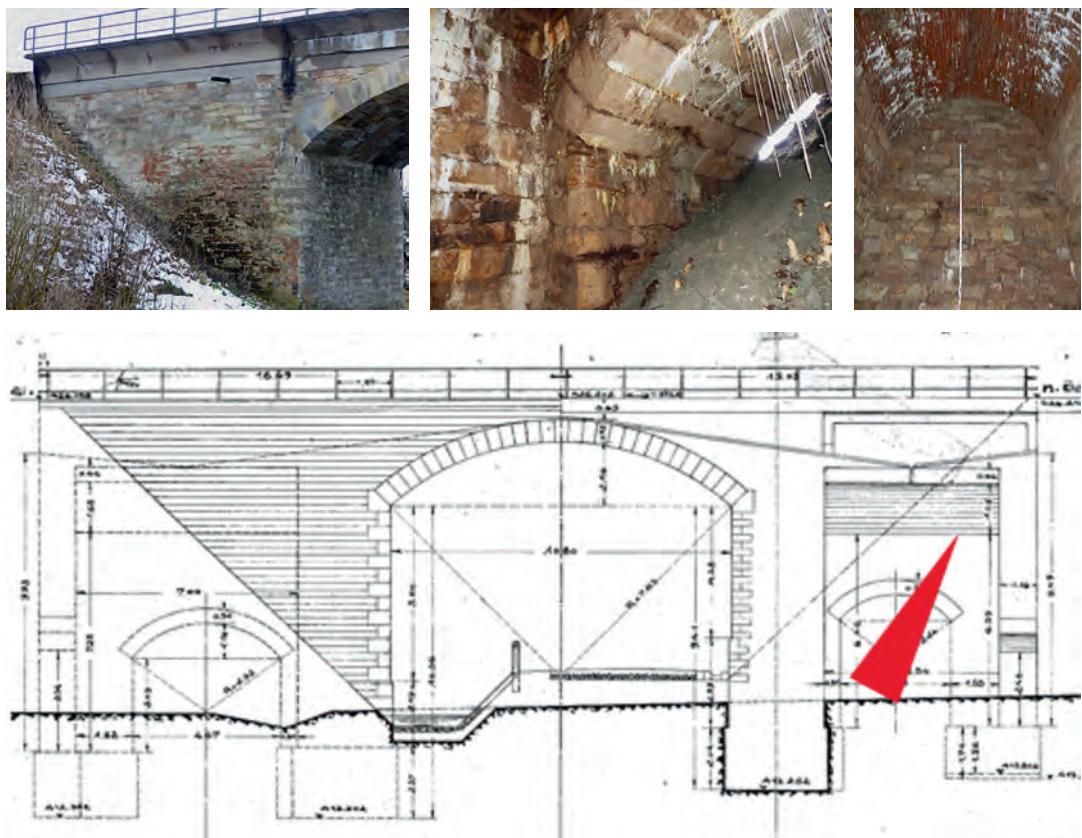


Bild 6. Gewölbe Hohlkammern im Widerlagerbereich, Blickrichtung in Rot

überraschend keine einfachen Widerlagerflügel, sondern massive Seitenwände vor, die in der Lage waren, Teile der Belastungen am Mauerwerk zu verteilen und nach unten abzuleiten. Die Mächtigkeit der Kammern wird in Bild 6 deutlich. Diese Feststellung war zugleich sehr bedeutend für den neuen Ansatz einer realitätsnahen Nachrechnung des Bauwerks.

Aus den Bohrkernen (s. Bild 7) wurden normgerechte Proben für Laborversuche an Natursteinen ausgearbeitet. Die geführten Untersuchungen waren auf die Bestimmung von relevanten Parametern der Druck- und Biegezugfestigkeit ausgerichtet. Weiterhin wurden aus den auffällig von Salzausblühungen befallenen straßennahen Steinoberflächen Bohrmehlproben entnommen, um die Tiefenwirkung der Salzschäden zu ermitteln.

Der verrohrte Bachlauf wurde mittels einer schwimmend eingesetzten Kamera inspiziert und sowohl Risse als auch Leckstellen detektiert.

Die ersten Daten aus der Baugrunderkundung, die zunächst für einen Neubau angeordnet wurde, konnten während der Bauwerksuntersuchung analysiert und insbesondere im Hinblick auf den Zustand der Gründung und auf die Setzungsabschätzung mit dem tatsächlichen Langzeitverhalten des Bauwerks verglichen werden. Im Ergebnis stand fest, dass u. a. die gründungsnahen weichen Böden außerhalb des Bauwerks nicht unter dem Fundament zu erwarten sind. Weiterführende Untersuchungen des Teams „Geotechnik“ wurden daraufhin unternommen.