gefördert durch

DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

LWL Für die Menschen. Für Westfalen-Lippe.

Abschlussbericht

Münster Februar 2024

Projekt: **Umgang mit Althydrophobierungen**
Modellhafte Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein
Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens

Gefördert unter: **AZ 34759/01+02 gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Projektlaufzeit: 01.04.2019-01.04.2023

Autorenschaft der Bilder im Abbildungsverzeichnis aufgeführt

Projektleitung: LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen
Referat Restaurierung und Dokumentation
Dr. Birte Graue
Freiherr-vom-Stein-Platz 1
48147 Münster
Tel: 0251 591-3571
Email: birte.graue@lwl.org

Projektpartner:

HAWK Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim

FH;P Fachhochschule Potsdam University of Applied Sciences

CICS Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft Technology Arts Sciences TH Köln

IWT

Wennemer Restaurierung Bildhauerei

Bearbeitung: Dr. Birte Graue, Prof. Dr. Peter Kozub, Prof. Dr. Jeannine Meinhardt, Dr. Frank Schlütter, Dipl.-Rest. Gerhard D`ham, Hon-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer, M.A., Dipl.-Rest. Friederike Funke, Jana Schröder M.A., Dr. Kirsti Krügener, Marcus Rüße M.A., Robert Wennemer M.A., Christoffer J. Diedrich M.A., Carsten Haubrock, Sabine Niggemann, Marc Ziegert, Wolfram Zalberg, Michael Peren, Alina Bußmann, Filip Kozik, Jana Lea-Marie Kraus, Quint Thibault Schulz, Lilian Beile, Dorothée Schraeder, Dipl.-Rest. Nikolai Hartmann, Lale von Baudissin, Rebecca Knapp, Dipl.-Rest. Katja Schmeikal M.A.

Projektpartnerinnen und Projektpartner:

MPA Bremen Abt. Analytische Baustoffmikroskopie Dr. Frank Schlütter, Paul-Feller-Str. 1 28199 Bremen Tel. 0421-53708-43, E-Mail: Email: schluetter@mpa-bremen.de	**FH Potsdam** Fachhochschule Potsdam Fachbereich STADT BAU KULTUR, Studienrichtung Konservierung und Restaurierung – Stein Prof. Dr. Jeanine Meinhard, Kiepenheuerallee , 14469 Potsdam Tel: 0331-580-4218 Email: jeannine.meinhardt@fh-potsdam.de
TH Köln Fakultät für Kulturwissenschaften CICS Prof. Dr. Peter Kozub Ubierring 4 50678 Köln Tel: 0221-8275-3624 Email: peter.kozub@th-koeln.de	**HAWK** Hildesheim/Holzminden/Göttingen Fakultät Bauen und Erhalten Steinobjekte und Architekturoberflächen Dipl.-Rest- Gerhard D´ham (Werstattleitung) Bismarckplatz 10/11 31135 Hildesheim Tel: 05121-881-380 Email: gerhard.dham@hawk.de
Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege (NLD) Frau Dr.-Ing. Christina Krafczyk (Präsidentin) Ansprechpartner: Hon.-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer Scharnhorststraße30175 Hannover Nachfolge: Dipl.-Rest. Maja Ossig Tel: 0511-925-5211 Email: maja.ossig@nld.niedersachsen.de	**Wennemer** Restaurierung – Bildhauerei Robert Wennemer Auf der Laer 9 48157 Münster Tel: 0245-314163 Email: info@wennemer.com

Vorwort und Dank

Baumberger Kalksandstein ist ein besonderes Denkmalgestein in Westfalen-Lippe. Prominente Bauwerke, wie der Dom, das Schloss und der Erbdrostenhof in Münster sowie viele Schlösser, Wasserburgen und Herrensitze in Westfalen sind aus dem Kalkstein errichtet, der wie ein Sandstein anmutet. Auch viele Kleindenkmäler sind aus ihm erschaffen: Skulpturen, Wegekreuze und Bildstöcke sowie Kreuzwegstationen.
Diese Aufzählung könnte noch sehr viel länger sein und macht deutlich, wie wichtig Erhaltungsstrategien für dieses Gestein und seine Bauwerke sind.
Baumberger Kalksandstein ist wenig verwitterungsresistent, insbesondere Umwelteinflüsse haben ihn in der Vergangenheit geschwächt. Durch Hydrophobierungen wurde in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts versucht, dem Zerfall entgegenzuwirken, leider haben sich – so weiß man heute – die Schäden dadurch oftmals verstärkt. Der Klimawandel ist die Herausforderung der Zukunft für den feuchteempfindlichen Stein.

Alle Beteiligten des Projekts haben intensiv an dem gemeinsamen Ziel gearbeitet: einen praxisorientierten Leitfaden zum Umgang mit den Objekten aus diesem besondere Steinmaterial. Dieser Leitfaden soll helfen, die Schäden besser einordnen zu können, individuell angepasste Erhaltungsmaßnahmen zu planen und durchzuführen sowie durch die richtige Pflege für die langfristige Wirkung dieser Maßnahmen und damit den Erhalt der Denkmäler zu sorgen.

Die Ergebnisse dieses Projektes werden nicht nur die Restaurierung und die praktische Denkmalpflege in Westfalen-Lippe unterstützen und weiter voranbringen, die gewonnenen Erkenntnisse können auch auf andere Denkmäler übertragen und bei weiteren Erhaltungsstrategien angewandt werden.

Ein großer Dank gilt allen am Projekt Beteiligten für die intensive Zusammenarbeit, für das starke Engagement und auch für die Ausdauer, die Unbilden der Corona-Pandemie – in die wir mit der Projektlaufzeit mitten hineingeraten sind – zu umschiffen.
Für die Unterstützung, die dieses Projekt ermöglicht hat, und die Begleitung bei der Durchführung danke ich der Deutschen Bundesstiftung Umwelt – namentlich Constanze Fuhrmann – sehr.

Münster, 15.02.2024
Dr. Birte Graue

Kurzzusammenfassung

Baumberger Kalksandstein ist seit Jahrhunderten ein beliebtes Baumaterial in Westfalen-Lippe. Viele prominente Bauwerke und eine besonders große Anzahl bildhauerisch bearbeiteter Denkmäler sind aus dem Steinmaterial geschaffen.
Der feinporige, Tonmineral führende Kalkstein ist gegenüber Umwelteinflüssen – insbesondere SO_x früherer Jahrzehnte – wenig verwitterungsresistent. Hydrophobierungen der 1960-80er Jahre sollten dem Zerfall entgegenwirken, leider haben sich – so weiß man heute – die Schäden dadurch meist verstärkt. Mittlerweile zeigen die Denkmäler wiederholte Restaurierungen in immer kürzer werdenden Zeitintervallen. Zukünftig wird der Verwitterungsangriff durch den Klimawandel den feuchteempfindlichen Stein noch stärker belasten.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und die Erstellung eines praxisorientierten Leitfadens für die Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein. Der Leitfaden ist als **Modulares Management: *RESTAURIERUNG 3.0*** in die drei Module *ERKENNEN – HANDELN – PFLEGEN* unterteilt, entlang derer auch das Projekt verläuft.
Im ***MODUL : ERKENNEN*** werden die an den ausgewählten Objekten vorliegenden Schäden systematisch untersucht, erfasst und dokumentiert. Ein im Projekt entwickeltes Modulares Untersuchungsprogramm unterstützt die Schadensdetektion.
Im ***MODUL : HANDELN*** werden individuell angepasste Handlungsoptionen und Erhaltungsmaßnahmen im Baukastensystem entwickelt. Die Praxisanwendung wird durch den Modularen Maßnahmenkatalog nach Baukastenprinzip unterstützt.
Das ***MODUL : PFLEGEN*** stellt ein Modulares Monitoring-Programm vor, dass individuell an das jeweilige Objekt und die durchgeführten Restaurierungs-/Konservierungsmaßnahmen adaptiert wird.

Neben dem in der Praxis anwendbaren Online-Leitfaden können anhand umfangreicher, materialspezifischer Untersuchungen an Nachstellproben aus Baumberger Kalksandstein die schädigungsverstärkenden Mechanismen der Althydrophobierung herausgearbeitet werden. Da hier maßgeblich feuchteabhängiges Materialverhalten die Schadensprozesse antreibt, sind vor dem Hintergrund des Klimawandels und damit verbundener, zunehmend höherer Feuchten, Maßnahmen der Präventiven Konservierung – insbesondere Einhausungen, Schutzdächer und Überdachungen – und solche Maßnahmen mit der Funktionalität als Opfer- oder Verschleißschicht zukünftig zielführend.
Ein besonderes Augenmerk kommt dem Monitoring und der Wartung zu. Die mehrfach restaurierten und sanierten Denkmäler bleiben verwitterungsanfällig und müssen zukünftig gepflegt werden, um die langfristige Wirkung der durchgeführten Maßnahmen sicherzustellen. Das im Projekt entwickelte UAV-gestützte SfM-Monitoring ist hier eine innovative, kosteneffiziente Methode für ein hochaufgelöstes Monitoring schwer zugänglicher Bereiche.

Neben dem öffentlich zugänglichen, webbasierten Praxisleitfaden, präsentieren sich Projektdaten, Forschungsergebnisse und verknüpfte Informationen über eine Projekt-Website den Denkmalbehörden, Fachleuten im Bereich der Denkmalpflege und der interessierten Öffentlichkeit.
Durch Schulungsveranstaltungen aus Vortragsteil und praktischer Übung an Objekten vor Ort wird die Anwendung und Umsetzung des digitalen Praxisleitfadens vermittelt. Denkmalbehörden, Forschungsinstitute, Fachleute der Denkmalpflege und wissenschaftlich Interessierte haben über die Datenbank der Fachanwendung KLARA-Delos den Zugang zu relevanten Daten und Forschungsergebnissen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 8

1.1 Ausgangssituation ... 8
1.2 Projektziel ... 8
1.3 Problemstellung ... 9
1.4 Projektbearbeitung ... 12

2. Baumberger Kalksandstein ... 12

2.1 Vorkommen und Nutzung ... 12
2.2 Geologie, petrographische Beschreibung und gesteinsphysikalische Kennwerte ... 13

3. Vorstellung untersuchter Objekte ... 16

4. Probenbezeichnung und Probenorientierung ... 31

4.1 Bruchfrisches Material ... 31
4.2 Kernmaterial historischer Werksteine ... 32

5. Untersuchung an bruchfrischen Materialproben ... 33

5.1 Mikroskopische Gefüge-Analysen ... 33
5.2 Rasterelektromikroskopische Untersuchung ... 38
5.2.1 Methodik ... 38
5.2.2 Ergebnisse ... 39
5.2.3 Auswertung ... 41
5.3 Porenraumparameter ... 42
5.3.1 Porositätsmessungen/Porenraumverteilung ... 42
5.4 Wassertransporteigenschaften, Biegezugfestigkeit, statisches E-Modul und Ultraschallmessung /Bericht FH Potsdam ... 45
5.4.1 Probematerial ... 45
5.4.2 Methodik ... 47
5.4.3 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekapazität ... 47
5.4.4 Wasseraufnahme nach Karsten ... 50
5.4.5 Abhängigkeiten der Messung mit dem Karstenschen Prüfröhrchen ... 51
5.4.6 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Mirowski ... 52
5.4.7 Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands ... 53
5.4.8 Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit und des statischen E-Moduls ... 54
5.4.9 Ultraschallmessung ... 55
5.4.10 Ergebnisse ... 56
5.4.11 Petro-Physikalische Eigenschaften ... 63
5.4.12 Versuchsdurchführungen ... 63
5.5 Dilatationsverhalten ... 74
5.5.1 Hydrische Dilatation ... 74
5.5.2 Thermische Dilatation ... 76
5.6 Frost-Tau- Wechsel ... 79
5.6.1 Prüfnormen zur Strukurschädigung von Naturstein mittels Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ... 79
5.6.2 Versuchsdurchführung ... 81
5.6.3 Organoleptische Untersuchung ... 83
5.6.4 Messungen ... 83
5.6.5 Mikroskopische Untersuchung ... 84
5.6.6 Organoleptische Befunde ... 84
5.6.7 Messergebnisse ... 85

6. MODUL : ERKENNEN ... 88

6.1 Objektbeispiele ... 88
6.2 Benennung der Maßnahmen für das MODUL: ERKENNEN ... 91
6.3 Methodik ERKENNEN ... 92
6.4 Fallbeispiele ... 96
6.4.1 Haus Alst – Nordfassade/Werkstein ... 96

6.4.2 Haus Stapel – Kreuzigungsgruppe/Skulptur ... 110
6.5 Untersuchung an Objektproben ... 141
6.5.1 Tropfenaufsetzmethode ... 141
6.5.2 Mikroskopische Dünnschliffanalyse ... 148
6.5.3 Quantitative chemische Salzanalyse ... 157
6.5.4 Bohrwiderstandsmessungen am Bohrkern ... 172
6.5.5 Ultraschalllaufzeitmessung an Bohrkernen ... 182
6.6 Untersuchung an Nachstellproben ... 183
6.6.1 Hydrophobierung – Begriffsdefinition ... 183
6.6.2 Ausgewählte Hydrophobierungsmittel ... 185
6.6.3 Versuche zum Tränkungsverhalten mit Hydrophobierungsmitteln ... 190
6.6.4 Vakuumtränkung von BKS-Prismen mit Hydrophobierungsmittel ... 191
6.6.5 Untersuchungen zum Einfuss der KSE H-Hydrophobierung auf ausgewählte physiko-mechanische Eigenschaften von Baumberger Kalksandstein ... 193
6.6.6 Untersuchungen des thermischen und hygrischen Verhaltens von unbehandelten und hydrophobierten Baumberger Kalksandstein/ Teil1 ... 211
6.6.7 Untersuchungen des thermischen und hygrischen Verhaltens von unbehandelten und hydrophobierten Baumberger Kalksandstein/ Teil2 ... 217
6.7 Schadenskatalog ... 222
6.8 Modulares Untersuchungsprogramm ... 230
6.9 Kartierungsglossar ... 230
6.10 Umsetzung des Moduls anhand der Musterfläche ... 233
6.10.1 Objektdatenblatt ... 233
6.10.2 Zustandskartierung ... 236
6.10.3 Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen ... 240
6.10.4 Quantitative chemische Salzanalyse ... 242

7. MODUL : HANDELN ... 246

7.1 Systematisierung der erfassten früheren Maßnahmen ... 247
7.1.1 Bewertungsindex ... 248
7.1.2 Aussagen zum Bewertungsindex ... 251
7.2 Konzeptentwicklung ... 252
7.2.1 Voraussetzungen und Herausforderungen ... 252
7.2.2 Auswahl Restaurierungsmaterialien ... 253
7.2.3 Auswahl Restaurierungsmethoden ... 253
7.2.4 Konservierungskonzept für bildhauerisch bearbeitete Objekte ... 254
7.2.5 Konzeption zur Restaurierung von steinmetzmäßig bearbeiteten Werksteinen aus Baumberger Kalksandstein ... 256
7.3 Fallbeispiel: Restaurierung an Skulpturen – Kreuzigungsgruppe Ahlen ... 257
7.3.1 Objektidentifikation ... 257
7.3.2 Vorzustand/Schadensbilder ... 258
7.3.3 Zielsetzung/Restaurierungskonzept ... 259
7.3.4 Durchgeführte konservatorische Maßnahmen ... 259
7.3.5 Fotografische Zustandsdokumentation Restaurierung ... 261
7.3.6 Verwendete Materialien ... 274
7.4 Fallbeispiel: Restaurierung an Werkstein - Musterfläche Werkstein Haus Stapel ... 274
7.4.1 Objektidentifikation ... 275
7.4.2 Objektbeschreibung ... 275
7.4.3 Zustandsbeschreibung ... 276
7.5 Restaurierungskonzept Werkstein ... 276
7.5.1 Oberflächenreinigung ... 277
7.5.2 Reduzierung schwarzer Krusten ... 278
7.5.3 Abnahme loser Schalen und Schuppen ... 278
7.5.4 Entfernung zementhaltiger Mörtel ... 279
7.5.5 Entfernung rostiger Dübel/Klammer ... 280
7.5.6 Strukturelle Festigung ... 281
7.5.7 Ergänzung mit Steinersatzmörtel ... 281
7.5.8 Rissinjektion ... 283

7.5.9 Fixierung von Bruchstücken ... 283
7.5.10 Vierungen aus Naturstein ... 284
7.5.11 Steinaustausch ... 284
7.5.12 Fugenaustausch mit Kalkmörtel ... 285
7.5.13 Schlämmauftrag ... 285
7.5.14 Verwendete Materialien ... 286
7.5.15 Maßnahmenkartierung ... 287
7.5.16 Fotografische Zustandsdokumentation Restaurierung ... 291
7.6 Modularer Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip ... 300
7.6.1 Auswahl von Restaurierungsmaterialien ... 300
7.6.2 Auswahl von Restaurierungsmethoden ... 301

8. MODUL : PFLEGEN ... 302

8.1 Restaurierung erfordert Nachhaltigkeit ... 302
8.2 Monitoring: Ziele, Standards und Methoden ... 303
8.2.1 Monitoring Methoden ... 304
8.3 Fallbeispiele ... 309
8.3.1 Erfassung mikrotopographischer Veränderungen der Steinoberfläche über einen Vergleich zwei virtueller 3D-Zustandsmodelle ... 309
8.3.2 Prozessentwicklung eines UAV-gestützten Monitoring-Verfahrens für ornamentale Steinobjekte mittels 3D-Oberflächenabgleich ... 314
8.3.3 Objektspezifisches Monitoring-Konzept: Fassade Schloss Münster ... 319
8.3.4 Objektspezifisches Monitoring-Konzept: Musterfläche ... 325
8.4 Modulares Monitoring Programm ... 328

9. Ergebnisse – Erkenntnisse ... 334

9.1 Bedeutung: „hydrophobiertes Objekt" ... 334
9.2 Verwitterungsprozesse in Baumberger Kalksandstein ... 335
9.3 Schloss Münster Status quo und quo vadis\ Schadensprognose und- verlauf ... 336
9.4 Modell-Versuch: Ergänzung mit Steinersatzmörtel ... 339
9.5 Klimawandeladaption: Präventive Konservierung durch Wintereinhausungen ... 340
9.5.1 Objektbeispiel Telgte ... 340
9.5.2 Jagdschloss Clemenswerth ... 342
9.6 Innovation: UAV- gestütztes SfM-Monitoring ... 344
9.7 Fazit 346

10. Wissensvermittlung und Verbreitung ... 347

10.1 Implementierung der Projektdaten ... 348
10.2 Projekt-Website ... 349
10.3 Modularer Online-Praxisleitfaden ... 349
10.4 Schulung zum Praxisleitfaden für Baumberger Kalksandstein ... 351

11. Zusammenfassung und Ausblick ... 352

11.1 Zusammenfassung ... 352
11.2 Ausblick ... 354

12. Verzeichnisse ... 355

12.1 Abbildungsverzeichnis ... 355
12.2 Diagramverzeichnis ... 334
12.3 Tabellenverzeichnis ... 360

13. Literaturverzeichnis ... 362

1. Einleitung

(Birte Graue, Kirsti Krügener, LWL-DLBW, Frank Schlütter, MPA/Leibniz-IWT)

1.1 Ausgangssituation

Baumberger Kalksandstein ist seit Jahrhunderten ein beliebtes Baumaterial. Viele prominente Bauwerke und eine besonders große Anzahl bildhauerisch bearbeiteter Denkmäler sind aus dem Material geschaffen, dass sich vor allem bruchfrisch sehr fein detailliert bearbeiten lässt.
Heute zeigen die Denkmäler aus Baumberger Kalksandstein oftmals starke Schäden, die zum einen in der geringen Verwitterungsresistenz des Gesteins begründet sind, sich jedoch leider auch auf frühere Konservierungsmaßnahmen zurückführen lassen. Mit den besten Schutzabsichten wurden unterschiedliche Materialien aufgetragen, um das Steinmaterial festigend und/oder wasserabweisend zu imprägnieren sowie auch zu beschichten, denn Wasser war als Hauptschadensfaktor bei dem Tonmineral führenden Gestein erkannt worden.
Hier zeigt sich in Westfalen, aber auch weit über die Grenzen hinaus, wiederkehrend Handlungsbedarf im Umgang mit den sehr stark durch anthropogene Umwelteinflüsse geschädigten Denkmälern aus Baumberger Kalksandstein, die in früherer Zeit zum eigentlichen Schutz hydrophobiert wurden.
Konservierungsmaßnahmen hatten zum Ziel, in den porösen Naturstein eindringendes Wasser, durch Beregnung und Spritzwasser, als Schadensfaktor zu reduzieren. So haben in den 1950-80er Jahren Denkmäler aus Baumberger Kalksandstein in Westfalen fast flächendeckend eine Hydrophobierung mit den unterschiedlichsten Materialien erfahren. Dass das verfolgte Ziel meist nicht erreicht wurde, lässt sich heute leider an den vielen stark geschädigten Objekten ablesen: Es zeigen sich massive substanzielle Schäden durch Entfestigung, Schuppen- und Schalenbildung, die mit einem fortschreitenden Materialverlust einhergehen.
Der Klimawandel mit Extremwetterlagen und insgesamt höheren Feuchten stellt den Erhalt der Denkmäler zukünftig vor neue Herausforderungen.

1.2 Projektziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und die Erstellung eines praxisorientierten Leitfadens für die Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein.
Dabei wird auf drei Hauptaspekte *ERKENNEN – HANDELN – PFLEGEN als* **Modulares Management: *RESTAURIERUNG 3.0*** abgesetzt.

Das MODUL : ERKENNEN	soll zur Schadensdetektion dienen: die am jeweiligen Objekt vorliegenden Schäden sollen systematisch erkannt, untersucht und erfasst sowie dokumentiert werden.
Im MODUL : HANDELN	werden individuell angepasste Handlungsoptionen und Erhaltungsmaßnahmen im Baukastensystem entwickelt.
Das MODUL : PFLEGEN	stellt ein modulares Monitoring-Programm, abgestimmt auf das jeweilige Objekt und die durchgeführten Restaurierungs-/Konservierungsmaßnahmen, vor.

Abb. 1: *Flow Chart: Empfehlung der denkmalpflegerischen Beratung anhand des Leitfaden* ***Modulares Management: RESTAURIERUNG 3.0.***

Gesamt können die denkmalpflegerischen Berater vor Ort mit diesem Leitfaden gezielt ein dem Objekt gerechtes Untersuchungs-, Maßnahmen- und Monitoring-Paket als Empfehlung aussprechen, adäquate langfristig wirksame Maßnahmen sowie die nachhaltige Pflege planen und mit dem Denkmaleigentümer umsetzen.
Der im Projekt entwickelte webbasierte Leitfaden wird durch Schulungen für in der Denkmalpflege Tätige (kommunale Denkmalbehörden, Denkmaleigentümer:innen, Restaurator:innen, Architekt:innen, Hochschul-Seminarcurriculum, etc.) vermittelt. Dieser Leitfaden ist über ein Internetportal jederzeit für die interessierte Öffentlichkeit und Denkmalbehörden öffentlich zugänglich, zudem können die Daten über die Fachanwendung KLARA-Delos (DenkmalDatenbank des Fachamtes) abgerufen und verwendet werden.

1.3 Problemstellung

Umweltrelevanz

Baumberger Kalksandstein zeigt als Tonmineral führender Naturwerkstein gerade bei Verwendung im Außenbereich und den Umwelteinflüssen – insbesondere SOx-Einfluss früherer Jahrzehnte – eine eher geringe Verwitterungsresistenz. Aufgrund unterschiedlicher bauphysikalisch-klimatischer Wechselwirkungen gerade im Zusammenspiel mit Feuchte und/oder Wasser kommt es zu Volumenveränderungen, die mit Gefügeschäden und Entfestigungen einhergehen. Hierbei kommt es zu Absprengung und Verlust von originaler Steinsubstanz. Bei bildhauerischen Werken führt dies zu Formverlust und Unlesbarkeit der Bildwerke und Denkmäler. Aber auch im Bereich von Natursteinfassaden aus Baumberger Kalksandstein entsteht eine Verunklärung des Fugenbildes und der Verlust des Mauerwerkverbundes und somit des charakteristischen Ausdrucks des Baudenkmals.

Der Forschungsstand zu Umweltschäden an Naturstein Mitte des 20. Jahrhunderts legte nahe, dass das Abhalten von Wasser die schädigenden Umwelteinträge – überwiegend aggressive Verbindungen von Niederschlagswasser und Immissionen – verhindern würde und so weitere Schäden vermieden werden könnten. In den 1970er und 1980er Jahren – entsprechend dem damaligen Kenntnisstand – führte das zur verbreiteten Anwendung von Hydrophobierungsmitteln an Baumberger Kalksandstein. Noch Mitte der 1980er Jahre wurde die Auffassung vertreten, dass „Hydrophobierungen den bislang einzigen

prophylaktischen Verwitterungsschutz für mineralische Baustoffe darstellen…" (MARSCHNER, 1985). Oft erfolgte eine Hydrophobierungsmaßnahme als letzter Arbeitsschritt einer meist sehr aufwendigen und kostenintensiven „Gesamt"-Sanierung, z.B. bestehend aus Steinaustausch, Festigungen (mit siliziumorganischen oder mit Kieselsäureester-Produkten), Steinergänzung u.v.m. So wurden an zahlreichen wertvollen Natursteinfassaden herausragender Baudenkmäler große Mengen von Polymeren und Hydrophobierungen auf siliziumorganischer Basis aufgebracht, um die Wasseraufnahme und damit die Schadstoffdeposition zu verhindern, in der Absicht Schäden vorzubeugen.

Hydrophobierung von Naturstein

Hydrophobierungen werden etwa seit Mitte der 60er Jahre durchgeführt. Seit dieser Zeit haben neben Entwicklungen der Anwendungstechniken wesentliche Veränderungen der Hydrophobierungssubstanzen stattgefunden. Seit ca. 20 Jahren besitzen diese Materialien auf siliziumorganischer Basis die größte Bedeutung. Mit steigender Molekülgröße, durch die sich das Eindringvermögen in feinporige Baustoffe verringert, sind Silane, oligomere und polymere Siloxane und Silikonharze zu unterscheiden (MARSCHNER, 1985; SNETHLAGE, 1984; ROTH, 1988). Gemeinsames Endprodukt dieser Stoffe nach Aushärtung ist ein porenauskleidender Silikonharzfilm. Neben diesen Materialien wurden auch Stearate, metallorganische Verbindungen, fluorhaltige Verbindungen, niedrigmolekulare Acrylate mit hydrophoben Gruppen u.a. für wasserabweisende Imprägnierungen eingesetzt.
Eine Ursache für die unterschiedliche Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmitteln liegt in deren chemischer Anbindung an den Baustoff. Siliziumorganische Hydrophobierungsmittel binden bevorzugt an silikatische Bestandteile an. Diese sind bei Carbonatgesteinen (z.B. Kalkstein, Marmor) nicht in ausreichendem Maße vorhanden (SNETHLAGE, 1984).
Bei tonigen Gesteinen (z.B. Schilfsandstein) bleibt die Quellfähigkeit der Tonminerale nach der Hydrophobierung meist erhalten oder kann sich verstärken. Aufgrund der Steigerung des hygrischen Quellens besteht die Gefahr einer verstärkten Schalenbildung (MÖLLER et al., 1992). In der Dissertation von Kirsten (2008) ist u.a. beschrieben, dass eine Hydrophobierung der Tonminerale reichen thüringischen Lettenkeuper- und Schilfsandsteine aufgrund der hohen Anfälligkeit gegenüber hygrischen Längenänderungen und den daraus resultierenden Riss- und Schalenbildungen nicht empfohlen werden kann.

Das heterogene Gefüge einiger Natursteine behindert u.U. eine gleichmäßige Verteilung des Hydrophobierungsmittels und verursacht dadurch partiell ein Eindringen größerer Wassermengen. Auch die unterschiedliche Behandlung von verschiedenen unterschiedlich exponierten Bauteilen führt zu einer Heterogenität der Hydrophobierung am Bauwerk.
Grundsätzlich sollte für eine Hydrophobierung ein Mindestsaugvermögen gegeben sein (w-Wert >1 $kg/m^2h^{0,5}$). Neben einer ausreichenden Saugfähigkeit des Baumaterials ist eine gute Wirktiefe des Hydrophobierungsmittels notwendig. Die Wirksamkeit einer Hydrophobierung wird von den meisten Autoren anhand der Wasseraufnahme bewertet, Angaben zur Eindringtiefe sind eher selten. Das WTA Merkblatt 3-17-2010 enthält eine orientierende Darstellung des Zusammenhanges zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten w des Untergrundes und der erforderlichen Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels: Beispielsweise beträgt bei einem Gestein mit einem w-Wert <2 die Mindesteindringtiefe 7 mm, bei einem w-Wert von 5 muss eine Eindringtiefe von mindestens 10 mm erreicht werden. Dagegen verlangt ein stark saugendes Gestein mit einem w-Wert von 15 eine Mindesteindringtiefe von 23 mm. Eindringtiefen >40 mm sind grundsätzlich nicht erforderlich.
Zum heutigen Zeitpunkt sind zahlreiche Natursteinbauwerke aus den unterschiedlichsten Steinsorten hydrophobiert. Angesichts der dargestellten komplexen Zusammenhänge ist es nicht überraschend, dass die „Güte" der Hydrophobierungen sehr unterschiedlich ist. In vielen Fällen sind die Anwendungen nicht oder unzureichend dokumentiert. Art und Menge der applizierten Mittel sind genauso wenig

bekannt wie etwaige Voruntersuchungen oder Applikationstechniken. Mehr oder weniger ausgeprägte Schäden sind in sehr vielen Fällen für die hydrophobierten Bereiche oder Teilbereiche ein typisches Bild.

Langzeitverhalten von Hydrophobierungen

Bereits Ende der 1980er Jahre war die Beständigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen an etwa 200 gut dokumentierten Flächen an ca. 50 Bauwerken aus Naturstein umfassend in einem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (damals BMFT) geförderten Projekt untersucht worden (WENDLER & SATTLER, 1988, WENDLER et al. 1990). Wesentliches Resultat war die Erkenntnis, dass die Wirksamkeit einer solchen Maßnahme im Regelfall nach 10–15 Jahren an der Oberfläche deutlich nachlässt. In den meisten Fällen bleibt jedoch die Tiefenwirkung erhalten. Als Konsequenz bleiben solche Flächen nach Beregnung länger feucht als unbehandelte, da kein Wasser durch Kapillarzug nach innen transportiert wird. Durch den Abbau der Hydrophobierung von der Oberfläche her verstärken und überlagern sich die herkömmlichen Schadensprozesse mit hydrophobierungsspezifischen Schadensbildern. So wird z.B. stärkeres Absanden an der Steinoberfläche beobachtet, das auf die verstärkte Feuchteeinwirkung in Oberflächenbereichen zurückgeführt wird. Auch wird in diesen Bereichen verstärkter mikrobieller Bewuchs beobachtet.

Probleme wie Hinterfeuchtungen wurden in der Praxis bei Entscheidungen für oder gegen Hydrophobierungen unterschätzt, so dass auch Bereiche mit aufsteigender Feuchte hydrophobiert wurden. Häufig wurden gezielt diese Sockelzonen hydrophobiert, weil dort die stärksten Schäden an den Natursteinen vorlagen.

Über Rissbildungen oder auch schadhafte Fugen an Materialübergängen sowie unterschiedlichem Hydrophobierungsgrad im Material – Wechsel von hydrophoben/hydrophilen Oberflächen – kann ein Feuchteeintrag durch Niederschläge hinter die Hydrophobierungszonen stattfinden. Dieser Feuchteeintrag und auch weitergehend jener durch aufsteigende Feuchte, z.B. im Sockelbereich, kann einen Feuchtestau hinter der hydrophobierten Oberfläche zufolge haben (KIRSTEN, 2008).

Die durch frühere Imprägnierungsmaßnahmen veränderten Wassertransporteigenschaften des Steinmaterials – insbesondere des Wasserdampfdiffusionswiderstandes – können Trocknungsprozesse stark verlangsamt und in tiefer im Steininneren liegende Bereiche verschoben werden. Durch die oberflächennahen hydrophoben Materialbereiche zeigen sich mitunter stark abgegrenzte Schichten im Steinmaterial mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. Im Kontext der Wasser- und/oder Schadsalzanreicherungen ist die Langzeitfolge eine verstärkte Schadensentwicklung hinter dem hydrophobierten Steinabschnitt. In diesen Bereichen treten Spannungen auf, verstärkt durch Salzkristallisation und Frost. Neben Absanden sind v.a. Schalenbildung bis hin zum Verlust dickerer Schichten an originaler Steinsubstanz typische Schadensbilder und Indiz für Hinterfeuchtungen.

Bisheriger Umgang mit Althydrophobierungen (Reaktivierung, Wiederbehandlung)

In der Vergangenheit erfolgten Reparaturen an schadhaften hydrophobierten Natursteinobjekten in einer Kombination verschiedener Maßnahmen. Geschädigte Steinpartien wurden handwerklich repariert: Entfernen von Schalen, mitunter großflächiges Rückarbeiten loser Steinpartien, Steinaustausch, Vierungen, Steinergänzungen auf Mörtelbasis, Fugenreparaturen.

Dabei begrenzt die Resthydrophobie erheblich die Möglichkeiten für aktuell erforderliche Konservierungen und bauliche Maßnahmen durch die mangelnde Haftung mineralischer Baustoffe auf hydrophoben Flächen. Instandsetzungen und Konservierungsmaßnahmen auf wässriger Basis sind nicht mehr oder zumindest kaum möglich (MEINHARDT-DEGEN & SNETHLAGE, 2002).

Nach einer Reinigung erfolgte häufig eine Reaktivierung der Hydrophobierung durch eine erneute Applikation einer lösemittelhaltigen, wasserabweisenden Hydrophobierung.

Seit 2009 steht das WTA-Merkblatt 3-17-2009 „Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen" zur Verfügung, das die sachgerechte Planung und Durchführung von hydrophobierenden Imprägnierungen beschreibt und Entscheidungshilfen für deren praktische Durchführung am Objekt liefert. Die dort aufgeführten Voraussetzungen für die Planung einer Hydrophobierung sowie die empfohlenen Prüfungen und Untersuchungen können auch für Entscheidungen zum Umgang mit Althydrophobierungen herangezogen werden. Maßnahmen zum wirkungsvollen Abbau einer Hydrophobie aus wasserabweisenden Imprägnierungen stehen zum heutigen Zeitpunkt (noch) nicht zur Verfügung.

Einige früher restaurierte und hydrophobierte Denkmäler werden mittlerweile wiederholt restauriert, wobei unterschiedliche Materialien und Methoden zur Anwendung kommen. Häufig sind handwerkliche Reparaturen mit einem hohen Verlust an Originalsubstanz und dem wenig ressourcenschonenden Einsatz neuen Steinmaterials verbunden. Aus denkmalpflegerischer Sicht ist eine Evaluierung dieser Maßnahmen erforderlich und ein nachhaltiger Umgang mit den Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein zu finden. Hier bietet der Leitfaden Handlungsoptionen an.

1.4 Projektbearbeitung

Das Projekt zur Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens für die Restaurierung/Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein wurde mit den Partner:innen der Amtlichen Materialprüfanstalt Bremen/Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien, dem Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege, der Fachhochschule Potsdam, der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminden/Göttingen, dem Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft der Technischen Hochschule Köln und dem mittelständigen Unternehmen Wennemer aus Münster von April 2019 bis April 2022 an der LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen durchgeführt. Im Folgenden sind die Projektergebnisse zusammengetragen. Für den Inhalt des jeweiligen Kapitels zeichnet der/die Autor:in jeweils verantwortlich.

2. Baumberger Kalksandstein

(Björn Seewald, LWL-DLBW)

2.1 Vorkommen und Nutzung

Das unter dem Handelsnahmen „Baumberger Sandstein" bekannte Gestein steht als Relikt der mittleren Oberkreide (chronostratigraphische Stufe des Campans) im Bereich der Baumberge im Münsterland zwischen Münster und Coesfeld an. Die Bezeichnung „Sandstein" ist eigentlich irreführend, da es sich im geologischen Sinn um eine aus Trübeströmen (Turbiditen) entstandene Fließablagerung (Visser & Mirwald 1998; Hiss & Kaever 1997) handelt. Aufgrund dessen terrigener Komponenten – zuvorderst eines nennenswerten Quarzanteils – wäre beispielsweise die von Grimm vorgeschlagene Klassifizierung als „sandsteinartiges Karbonatgestein" aus petrographischer Sicht treffender (GRIMM, 1990)[1]. Diese Bezeichnung berücksichtigt den umgangssprachlichen Begriff „Kalksandstein" für dieses und ähnliche Materialien, an dessen weiterer Verwendung hier nicht gerüttelt werden soll.

Trotz geographisch enger Begrenzung des Gesteinsvorkommens konnten im Jahr 1975 noch 14 Steinbrüche, von denen damals zwei aktiv genutzt wurden, den (ehemaligen) Betreibern namentlich

[1]Anmerkung: Die im Bildatlas bzgl. des Baumberger Gesteins zu findenden Angaben beruhen auf Untersuchungen an Materialproben, die einen Carbonatanteil von > 60 % aufwiesen.

zugeordnet werden. Darüber hinaus waren mindestens zwei Dutzend frühere Abbaustellen im Gelände nachweisbar (KAPPLAN, 2009). Im Jahr 2023 sind noch zwei bis drei Brüche in Betrieb bzw. zugänglich.

Archivalisch belegt ist die Verwendung als Werkstein seit dem 13. Jahrhundert. Der für den Abbau im Tagebau neben dem geläufigen „Steinbruch" erwähnte Begriff „Steinkuhlen" legt eine traditionell kleingewerbliche oder auch zeitlich begrenzte Gewinnung, etwa als Nebengewerbe einzelner Hofstellen oder für die Dauer eines konkreten Bauvorhabens (z. B. „Domkuhlen") nahe.— Eine gebührende Würdigung aus kunsthistorischer Sicht kann hier nicht Thema sein, zu diesem Aspekt sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Materielle Zeugnisse für die Verwendung des Baumberger Kalksandsteins gibt es schon aus früheren Zeiten als der des oben erwähnten archivalischen – so bereits aus dem 11. Jahrhundert in Gestalt von Bildhauerarbeiten in der Abteikirche in Essen-Werden. Bereits zu dieser Zeit muss der Stein aus den Baumbergen in solch einem guten Ruf gestanden haben, dass er bis an die Ruhr transportiert wurde – obwohl dort mit den „Ruhrsandsteinen" ein näherliegendes Material zur Verfügung gestanden hätte.
Als eines der bedeutendsten Verwendungsbeispiele für Mauerwerk und Bauplastik ist der Dom zu Münster und sind in dessen Folge viele Sakral- und Profanbauten vor allem im westlichen Münsterland zu nennen. Wegen seiner Eigenschaft als leicht zu bearbeitendes Material wurde der Baumberger Kalksandstein bevorzugt für die Steinbildhauerei herangezogen und war aufgrund der „Strahlkraft" Münsters als kulturelles Zentrum der damaligen Zeit bald auch außerhalb Westfalens bekannt und gefragt. Hierzu trug der Hansebund, in welchem Münster als eine der westfälischen Prinzipalstädte lange Zeit Mitglied war, erheblich bei. So ist nicht verwunderlich, dass an diesem Werkstein geschulte Steinmetze, Bildhauer und Baumeister auch im Nord- und Ostseeraum bis in die Niederlande und ins Baltikum nachweisbar und Gegenstände aus diesem Material in solch entfernten Orten wie Lübeck oder Ludgo in Mittelschweden zu finden sind (KARRENBROCK, 1998).

Das Verwendungsspektrum des Baumberger Kalksandsteins hat sich im Bereich von Bildhauerei und „Innenausbau" nicht wesentlich verändert; hinzu kommt eines als Schotter und Füllmaterial – für Werksteinzwecke im Außenbereich hat er, abgesehen von seiner Rolle als Ersatzmaterial im denkmalpflegerischen Bereich sowie für Architekturgliederungen, seine frühere Bedeutung aufgrund der teils mangelhaften Resistenz gegen Witterungseinflüsse weitgehend eingebüßt.

2.2 Geologie, petrographische Beschreibung und gesteinsphysikalische Kennwerte

Die oberen Schichten der Oberkreide sind im Münsterländer Kreidebecken (bzw. in der Westfälischen Oberkreidemulde) heute überwiegend erodiert. Neben den Baumbergen finden sich Sedimente des Campans noch in den Beckumer Bergen, wo diese als Rohstoff für die Kalk- und Zementindustrie dienen. Die der geologischen Baumberge-Formation zuzurechnenden Schichtglieder sind zum Teil als turbiditische Ablagerungen (von „turbatio" = Verwirbelung, hier aufgrund von unterseeischen Trübe- bzw. Suspensionsströmen) im Schelfbereich vermutlich in einer Tiefe von 150 bis 260 m entstanden (SMELOR, 1995). Deshalb kann diese Formation insgesamt keine homogene Einheit bilden. So wird der Werkstein von stärker mergeligen Schichten unter- und überlagert („Liegende -" respektive „Flammenmergel"). Aber auch die unter den Namen Flies, Lappen und Paol geläufigen Werksteinbänke weisen zum Beispiel unterschiedliche Härtegrade auf, was die Verwendung des gewonnenen Materials maßgeblich bestimmt. Aufgrund der wechselnden Ablagerungsbedingungen vor rund 70 Mio. Jahren verwundert nicht, dass die Sedimente der Baumberge-Formation in ihren Materialeigenschaften variieren – die verschiedenen Schichten bzw. Bänke haben teils ihre eigenen Charakteristika. Vor diesem Hintergrund werden auch die in der Literatur teils erheblich differierenden Angaben zu Petrographie und einzelnen Gesteinsparametern und infolgedessen den physikalischen Eigenschaften verständlich **Tab. 1**).

Von Hirschwald (1911/1912) und Schmöle (1925) liegen frühe petrographische Untersuchungen dieses Naturwerksteins vor, es folgten weitere u. a. von Kettelhack (1988 und 1992), Blöchl (1993) sowie sehr detailliert in den Jahren 1987 und 1988 am Zollerninstitut in Bochum (VISSER et al., 1998, S. 26-45). Bei Grimm (1990) findet sich folgende geologische Kurzbeschreibung: Gelblich-grauer, sandiger, fossilführender, feinporiger Kalkstein; bankig bis massig. Im makroskopischen Überblick wird weiterhin ausgeführt: Gelblich-grauer bis cremefarbener, feinkörniger und feinporiger, sandiger und glaukonitführender Kalkstein, stellenweise durch Eisenmineralkonkretionen braun gefleckt. Struktur: feinst- bis grobkörnig; Textur: ohne erkennbare Schichtung, feinporig. Bereits Grimm, auf dessen „Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bunderepublik Deutschland" (GRIMM, 1990, S.19) im folgenden weiter Bezug genommen wird, macht deutlich, dass sich seine Angaben und Quantifizierung „nur" auf die untersuchte(n) Probe(n) bezieht: Die der auf Tafel 145 wiedergegebenen Analyse zugrundeliegende umfasste 62 % Komponenten, 26 % Bindemittel und 12 % sichtbaren Porenraum. Die *Komponenten* setzten sich zusammen aus 39 % carbonatischen Extraklasten („Extraklasten" = dem Ablagerungsraum des Sediments von außen zugeführte Bestandteile), 31 % biogenen (überwiegend carbonatisch) sowie 19 % terrigenen Extraklasten (Quarz 16 % sowie Feldspat und Gesteinsbruchstücke 3 %); der Anteil an Intraklasten (Glaukonit) betrug 11 %. Hierbei bezeichnet der Begriff „Intraklasten" aus demselben Ablagerungsraum stammende Komponenten.

Das Bindemittel bestand zu 83 % aus überwiegend mikritischer[2] Matrix mit wenig Peloiden[3], zusätzlich fanden sich Kaolinit und Chalcedon als Porenraumfüllung (17 %).

Der sichtbare Porenraum lag im Größenbereich von 0,2 mm und kleiner, wobei die am häufigsten auftretende Größe 0,06 mm betrug und sowohl Inter- als auch Intrapartikelporen umfasste. Grimm beschreibt das Gefüge als korngestützt (untergeordnet matrixgestützt). Zusätzlich waren Spuren von Bioturbation erkennbar. Die Diagenese des Gesteins wird als von Sprossung fibrösen Zements um die Quarzkomponenten geprägt charakterisiert, Kaolinit und Chalcedon bilden sich authigen.

Visser und Mirwald (1998) stellen eine fehlende Repräsentanz der Materialbeschreibung von Grimm 1990 im Vergleich des heute abgebauten Materials fest. Vielmehr vermuten sie die Beschreibung eines „*historisch verwendeten Material einer Sonderfazies, welche heute nicht mehr abgebaut wird*" (VISSER & MIRWALD 1998, S. 29).

Visser und Mirwald (1998) machen für Mineralbestand und chemische Zusammensetzung folgende Angaben:

Tab. 1: *Mineralbestand und Zusammensetzung des Baumberger Kalksandsteins nach (VISSER/MIRWALD, 1998, S.31)*

Mineral/ -gruppe	Zusammensetzung	Anteil %	Vorkommen im Gefüge
Calcit	$CaCO_3$	49 - 66	Größere Fossilbruchstücke, Kleinstpartikel in der Grundmasse, Zement
Quarz	SiO_2	18 - 35	Detritische Körner
Kalifeldspat	$KAlSi_3O_8$	0,3 - 2	Detritische Körner
Tonminerale	Al-Schichtsilikate mit OH und K, Mg, Fe	9 - 14	Matrix: detritische Tonmineralplättchen (Illit) und neugebildete Tonminerale (Illit, Montmorillonit, Kaolinit); Glaukonit (neugebildet, zum Teil umgelagert)
Goethit	FeOOH	ca. 1	Neubildung (kryptokristallin)
Apatit	$Ca_5[(PO_4)_3OH]$	ca. 0,1	Fischzähne
Zirkon	$Zr[SiO_4]$	ca. 0,01	Detritische Körner

[2] Mikrit: Je nach Definition fein- bzw. kryptokristallines, in der Massenaggregation stumpf wirkendes Calciumcarbonat einer Korngröße < 4 µm als konstituierendes Merkmal eines aus Kalkschlamm entstandenen Kalksteins bzw. einer feinkarbonatischen Matrix („mudstone", „wackestone" und „packstone" gem. Dunham-Klassifikation).

[3] Ein aus Mikrit (bzw. Material unbekannter Herkunft) bestehender rundlicher Körper von 50 bis 500 µm Größe.

Nach Visser/Mirwald (1998) ist der Baumberger Kalksandstein überwiegend kalkig-tonig gebunden, frei von kieseligen Bindungsanteilen und in Deutschland der Stein mit dem höchsten Gehalt an quellfähigen Tonmineralen bei nur schwach entwickelter Kornbindung sowie mikroporöser Beschaffenheit.

***Tab. 2**: Übersicht über die petrophysikalischen Kennwerte des Baumberger Kalksteins (Auswahl verschiedener Quellen)*

Kenngröße	Angabe in	GRIMM (1990)	VENNEBÖRGER	VISSER/MIRWALD[1)]	BRAUN
Dichte, rein	g/cm^3	2,7		2,62	2,71
Dichte, roh	g/cm^3	2,18		2,09	2,16
Porosität	% (V)	19,08		17 - 24	20,18
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	% (M)	6,42			
Wasseraufnahme unter Vakuum	% (M)	8,76			
Sättigungsgrad		0,73		0,9	
w-Wert	$kg/(m^2h^{0,5})$			2,5	1,38
Hygrische Dehnung senkrecht zur Schichtung parallel zur Schichtung	mm/m			 0,2 – 0,9 0,1 – 0,15	
Wärmedehnungskoeffizient	1/K		$4 – 15 * 10^{-6}$		
Luftpermeabilität	mD	0,34			
Spezifische Oberfläche	m^2/g	9,23		7,7 – 13,3	0,85
Biegezugfestigkeit	N/mm^2		6 – 14,3 [2)]	10 – 12 [3)]	
Druckfestigkeit	N/mm^2		42 – 65	45 – 55	
Spaltzugfestigkeit	N/mm^2		1,7 – 2,6		
E-Modul [4)]	N/mm^2		6000 – 7000		

[1)] Die Angaben sind verschiedenen der im Text genannten Primärquellen entnommen
[2)] Gemessen wurde die uniaxiale Biegezugfestigkeit (3-Punkt-Verfahren)
[3)] Keine Angabe zum Messverfahren. Die Kenngröße ist als „Spaltzug-/Biegezugfestikgeit" bezeichnet
[4)] Keine Angabe, ob statisch oder dynamisch

2.3 Verwitterungsverhalten

Die klimatischen Gegebenheiten am Ort seiner Exposition bestimmen im Zusammenspiel mit dessen Bearbeitung bzw. Verbau sowie Mineralbestand und Gefüge das Verwitterungsverhalten eines Werksteins. Der Baumberger Kalksandstein kann einen hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen enthalten. Die hieraus resultierenden Dehn- und Schwindvorgänge als Ursache der allmählichen Gefügeauflockerung sind seit langem Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung. Seine verhältnismäßig hohe Porosität mit Schwerpunkt im kapillaraktiven Bereich und dem damit verbundenen hohen w-Wert sorgt in Verbindung mit der großen spezifischen Oberfläche für ausreichend Wasser- und Schadstoffangebot sowie Angriffsfläche, um – noch befördert durch eine relativ geringe Festigkeit – diverse Schadensprozesse in Gang zu setzen. Der Sättigungsgrad kommt dem kritischen Wert von 0,9, oberhalb dessen ein Werkstein als nicht mehr frostsicher gilt, teils nahe. Immer wiederkehrende Frost-Tau-Wechsel können somit abhängig vom Wassergehalt des Materials gravierende Schadensprozesse verursachen.

Seine calcitische Matrix prädestinierte den Baumberger Kalkstein in den Jahrzehnten des hohen, anthropogen bedingten SO2-Gehalts der Atmosphäre (also bis in die 1990er Jahre hinein) auch für chemischen Angriff, welcher hier zur Umwandlung von Calciumcarbonat in Gips mit den möglichen Folgen einer ungünstigen Beeinflussung der Gesteinseigenschaften durch Porenraumverdichtung und Einlagerung von „Schmutzpartikeln" führte. Besonders in Kombination mit einer nicht materialgerechten

Verwendung (z. B. Verbau „auf Spalt" statt „lagergerecht" bei druckbelasteten Teilen) zeigen die hier einleitend dargestellten Eigenschaften – auf den Außenbereich bezogen – die geringe Verwitterungsresistenz des Baumberger Kalksandsteins auf.
Die dargestellten Zusammenhänge haben schon früh zu der Erkenntnis geführt, dass der Baumberger Kalksandstein nach Möglichkeit vor Feuchtigkeit zu schützen ist, was in den 1970er und 80er Jahren – dem damaligen Kenntnisstand entsprechend – zur verbreiteten Anwendung unter anderem von Hydrophobierungsmitteln oder auch hydrophobierenden Zusätzen im Zusammenwirken mit Festigungsmitteln geführt hat.

3. Vorstellung untersuchter Objekte

(Friederike Funke; LWL-DLBW)

Für das Vorhaben wurden in Westfalen 34 Objekte und 36 Objektflächen an Gebäudeanlagen, Bauwerken und Kleindenkmälern aus Baumberger Kalksandstein und ein Vergleichsobjekt aus Niedersachsen – die steinernen Jagdtrophäen am Zentralbau von Schloss Clemenswerth – ausgewählt und je nach Ausgangssituation in den Modulen ERKENNEN, HANDELN und PFLEGEN bearbeitet (**Tab. 3**). An einigen größeren Denkmälern wurden mehrere Objektbereiche betrachtet, die im Folgenden nach Verortung berücksichtigt sind.

Tab. 3: *Objektübersicht und Zuweisung zu den Modulen*

	Kürzel	**Ort**	**Objekt**	**ERKENNEN**	**HANDELN**	**PFLEGEN**
1	Ah-a	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Löwenportal	X	X	
2	Ah-b	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Fassade/Freitreppe Innenhof Ostfassade	X		
3	Ah-c	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Freitreppe Westfassade	X		
4	Al	**Ahlen**	**Stadtpark Ahlen,** Kreuzigungsgruppe	X	X	
5	HSB	**Borken-Weseke**	**Haus Schmeing,** Fensterlaibung	X	X	
6	BT-Z	**Ennigerloh-Enniger**	**Zur Bunten Brücke bei Nr. 81 Bildstock,** Bildstock			X
7	HS-a	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Vorburg Seitentor, Nord	X	X	X
8	HS-b	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Vorburg Nordflügel, Fassade	X		X
9	HS-c	**Havixbeck**	**Haus Stapel** Torhaus	X		
10	HS-d	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Kreuzigungsgruppe	X		

	Kürzel	Ort	Objekt	ERKENNEN	HANDELN	PFLEGEN
11	HA-a	**Horstmar**	**Haus Alst**- Nordfassade Haupthaus	X		
12	HA-b	**Horstmar**	**Haus Alst**, - Eingangsportal	X		
13	HA-c	**Horstmar**	**Haus Alst** - Wappensteine	X	X	X
13	MP-a	**Münster**	**Kirche St. Petri** Bauzier/Adler am Chor	X	X	
14	MP-b	**Münster**	**Kirche St. Petri** Westportal/linkes Kapitell	X	X	
15	MS-a	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel, Ostfassade, Risalit, freistehende Dachvase	X	X	X
16	MS-b	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel Ostfassade, Risalit	X	X	X
17	MS-c	**Münster**	**Schloss Münster,** Mittelrisalit, Figurengruppe	X	X	X
18	NN-a	**Nordkirchen**	**Schlosspark Nordkirchen**, nördlicher Parkausgang, Frauentor	X		
19	NN-c	**Nordkirchen**	**Schloss Nordkirchen,** Freitreppe, Corps de Logis, Mittelrisalit östliche Chimären	X		
20	DS-a	**Rosendahl-Darfeld**	**Schloss Darfeld**, Galeriebau	X		
21	DS-b	**Rosendahl-Darfeld**	**Schloss Darfeld,** Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	X		
22	SH-a	**Sassenberg**	**Schloss von Harkotten** Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	X		
23	SH-b	**Sassenberg**	**Schloss von Harkotten** Skulptur der Anna im Innenraum	X		
24	SB-a	**Steinfurt**	**Wasserschloss Steinfurt**, Renaissance-Erker			X
25	BT-E	**Telgte**	**Am Emstor, Bildstock,** Bildstock	X		X
26	BT-M	**Telgte**	**An der Marienlinde,** Bildstock	X	X	

	Kürzel	Ort	Objekt	ERKENNEN	HANDELN	PFLEGEN
27	BT-N	**Telgte**	**Am oberen Emswehr,** Skulptur des Hl. Nepomuk	X		
28	BT-S	**Telgte**	**Am Steintor,** Doppelbildstock			X
29	BT-R	**Telgte**	**An der Bundesstraße 64,** Bildstock	X		X
30	BT-RB	**Telgte**	**Am Raestruper Bahnhof,** Bildstock	X		
31	BT-DH	**Telgte**	**Delsener Heide 50,** Doppelbildstock			X
32	BT-PG	**Telgte**	**An der Friedhofskapelle Grevenerstraße 5b,** 4 Bildstöcke/Priestergrab			X
33	BT-SH	**Telgte**	**Schwienhorst, bei Haus Nr. 15,** Bildstock			X
34	BT-MD	**Telgte**	**Mater Dolorosa/Kreuzigung,** Doppelbildstock			X
35	AV	**Vreden**	**Alte Vikarie,** Portal	X	X	
36	KV	**Vreden**	**Am Kalvarienberg,** Wegkreuz	X	X	

Ahaus

Schloss Ahaus	
Objektbezeichnung	Löwenportal
Objektkürzel	Ah-a
Adresse	Sümmelmannplatz 4 48683 Ahaus Kreis Borken
Klara-ID	268909

Schloss Ahaus		
Objektbezeichnung	Fassade/Freitreppe Innenhof Ostfassade	
Objektkürzel	Ah-b	
Adresse	Sümmelmannplatz 4 48683 Ahaus Kreis Borken	
Klara-ID	268962	

Schloss Ahaus		
Objektbezeichnung	Freitreppe/Westfassade	
Objektkürzel	Ah-c	
Adresse	Sümmelmannplatz 4 48683 Ahaus Kreis Borken	
Klara-ID	268963	

Ahlen

Kreuzigungsgruppe		
Objektbezeichnung	Kreuzigungsgruppe	
Objektkürzel	Al	
Adresse	Ecke Westwall/Parkstraße 59227 Ahlen Kreis Warendorf	
Klara-ID	5631	

Borken-Weseke

Haus Schmeing	
Objektbezeichnung	Fensterlaibung
Objektkürzel	HSB
Adresse	Holthausener Straße 9 59320 Borken-Weseke Kreis Borken
Klara-ID	8086

Ennigerloh-Enniger

Bildstock	
Objektbezeichnung	Gersmann Twiärs Stroat Bildstock
Objektkürzel	BT-Z
Adresse	Zur Bunten Brücke (bei Hausnummer 81) 59320 Ennigerloh-Enniger Kreis Warendorf
Klara-ID	11347

Havixbeck

Haus Stapel	
Objektbezeichnung	Pfeiler Vorburg Seitentor, Nord
Objektkürzel	HS-a
Adresse	Gennerich 18 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld
Klara-ID	269295

Haus Stapel		
Objektbezeichnung	Vorburg Nordflügel, Fassade	
Objektkürzel	HS-b	
Adresse	Gennerich 18 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld	
Klara-ID	269302	

Haus Stapel		
Objektbezeichnung	Torhaus	
Objektkürzel	HS-c	
Adresse	Gennerich 18 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld	
Klara-ID	105678	

Haus Stapel		
Objektbezeichnung	Kreuzigungsgruppe	
Objektkürzel	HS-d	
Adresse	Gennerich 18 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld	
Klara-ID	17459	

Horstmar

Haus Alst		
Objektbezeichnung	Nordfassade Haupthaus	
Objektkürzel	HA-a	
Adresse	Alst 1, 48612 Horstmar-Leer Kreis Steinfurt	
Klara-ID	123600	

Haus Alst		
Objektbezeichnung	Eingangsportal	
Objektkürzel	HA-b	
Adresse	Alst 1, 48612 Horstmar-Leer Kreis Steinfurt	
Klara-ID	268967	

Haus Alst		
Objektbezeichnung	Wappensteine	
Objektkürzel	HA-c	
Adresse	Alst 1, 48612 Horstmar-Leer Kreis Steinfurt	
Klara-ID	268965	

Münster

Kirche St. Petri		
Objektbezeichnung	Bauzier/Adler am Chor	
Objektkürzel	MP-a	
Adresse	Johannisstraße 5 48143 Münster Überwasser	
Klara-ID	27932	

Kirche St. Petri		
Objektbezeichnung	Westportal/linkes Kapitell	
Objektkürzel	MP-b	
Adresse	Johannisstraße 5 48143 Münster Überwasser	
Klara-ID	27932	

Schloss Münster		
Objektbezeichnung	Südflügel-Ostfassade, Risalit, freistehende Dachvase	
Objektkürzel	MP-a	
Adresse	Schlossplatz 2 48149 Münster	
Klara-ID	30434	

Schloss Münster		
Objektbezeichnung	Südflügel, Ostfassade Risalit	
Objektkürzel	MP-b	
Adresse	Schlossplatz 2 48149 Münster	
Klara-ID	30434	

Schloss Münster		
Objektbezeichnung	Mittelrisalit, Figurengruppe	
Objektkürzel	MP-c	
Adresse	Schlossplatz 2 48149 Münster	
Klara-ID	30434	

Nordkirchen

Schlosspark Nordkirchen		
Objektbezeichnung	Nördlicher Parkausgang, Frauentor	
Objektkürzel	NN-a	
Adresse	Schloßstraße/Capeller Allee 59394 Nordkirchen Kreis Coesfeld	
Klara-ID	120422	

Schloss Nordkirchen		
Objektbezeichnung	Freitreppe, Corps de Logis, Mittelrisalit östliche Chimären	
Objektkürzel	NN-c	
Adresse	Schloßstraße/Capeller Allee 59394 Nordkirchen Kreis Coesfeld	
Klara-ID	268968	

Rosendahl-Darfeld

Schloss Darfeld		
Objektbezeichnung	Galeriebau	
Objektkürzel	DS-a	
Adresse	Netter 23 48720 Rosendahl-Darfeld Kreis Coesfeld	
Klara-ID	95597	

Schloss Darfeld		
Objektbezeichnung	Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	
Objektkürzel	DS-b	
Adresse	Netter 23 48720 Rosendahl-Darfeld Kreis Coesfeld	
Klara-ID	123084	

Sassenberg

Schloss von Harkotten		
Objektbezeichnung	Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	
Objektkürzel	SH-a	
Adresse	Harkotten 1 48336 Sassenberg-Füchtorf Kreis Warendorf	
Klara-ID	118586	

Schloss von Harkotten		
Objektbezeichnung	Skulptur der Hl. Anna im Innenraum	
Objektkürzel	SH-b	
Adresse	Harkotten 1 48336 Sassenberg-Füchtorf Kreis Warendorf	
Klara-ID	268964	

Steinfurt

Wasserschloss Steinfurt		
Objektbezeichnung	Renaissance-Erker	
Objektkürzel	SB-a	
Adresse	Burgstraße 16 48565 Steinfurt-Burgsteinfurt Kreis Steinfurt	
Klara-ID	268969	

Telgte

Am Emstor		
Objektbezeichnung	Bildstock	
Objektkürzel	BT-E	
Adresse	Ostbeverner Str./Am Emstor 48291Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34448	

An der Marienlinde		
Objektbezeichnung	Bildstock	
Objektkürzel	BT-M	
Adresse	Kreuzung Münsterstraße/Münstertor48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	69945	

Am oberen Emswehr		
Objektbezeichnung	Skulptur des Heiligen Johannes von Nepomuk	
Objektkürzel	BT-N	
Adresse	Am oberen Emswehr 48291Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34862	

Am Steintor		
Objektbezeichnung	Doppelbildstock	
Objektkürzel	BT-S	
Adresse	Am Steintor 2b 48291Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34672	

An der Bundestraße 64		
Objektbezeichnung	Bildstock	
Objektkürzel	BT-R	
Adresse	Raestrup bei Hausnr. 33 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34485	

Am Raestruper Bahnhof		
Objektbezeichnung	Bildstock	
Objektkürzel	BT-RB	
Adresse	Am Raestruper Bahnhof 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	33628	

Delsener Heide		
Objektbezeichnung	Doppelbildstock	
Objektkürzel	BT-DH	
Adresse	Delsener Heide bei Hausnr. 50 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34730	

Priestergrab		
Objektbezeichnung	Vier Bildstöcke	
Objektkürzel	BT-PG	
Adresse	An der Friedhofskapelle Grevener Str. 5b 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	81842	

Schwienhorst		
Objektbezeichnung	Bildstock	
Objektkürzel	BT-SH	
Adresse	Bei Hausnummer 15 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34611	

Mater Dolorosa/Kreuzigung		
Objektbezeichnung	Doppelbildstock	
Objektkürzel	BT-MD	
Adresse	Wolbecker Straße 48291 Telgte Kreis Warendorf	
Klara-ID	34777	

Vreden

Vikarie der Kapelle Maria Brunn		
Objektbezeichnung	Portal	
Objektkürzel	BT-R	
Adresse	Alte Vikarie Kleinemast 60 48691 Vreden Kreis Steinfurt	
Klara-ID	35630	

Kreuz am Kalvarienberg		
Objektbezeichnung	Wegkreuz	
Objektkürzel	KV	
Adresse	Crosewick 67 48691 Vreden-Ellewick Kreis Steinfurt	
Klara-ID	35290	

4. Probenbezeichnung und Probenorientierung

(Birte Graue; LWL-DLBW)

4.1 Bruchfrisches Material

Für die in den Kapiteln 5 und 6 dargestellten Untersuchungen und Analysen werden bruchfrische Natursteinproben der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen – entnommen aus den jeweiligen Steinbrüchen – verwendet. Oberpaol und Unterpaol stammen aus dem Steinbruch Fark, die Varietät Lappen wurde dem Bruch der Firma Dirks entnommen.

***Tab. 4**: Probenbezeichnung.*

Varietät	Abkürzung
Unterpaol	UP
Oberpaol	OP
Lappen	L

***Abb. 2:** Kennzeichnung der Probenorientierung*

Die Proben wurden bei Entnahme aus den Steinbrüchen gekennzeichnet (vgl. **Abb. 2**), so dass die Ausrichtung der Foliation (Lager, Schichtung) und Lineation auf alle weiteren kleineren Probestücke übertragen werden und die entsprechenden Messungen ausgerichtet erfolgen können. Die jeweilige Probenpräparation ist in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

Durch die Meeresablagerung von Sand, Ton und Kalkpartikel entstand in der Oberkreidezeit eine „normale, langsame und geschichtete feinkörnige Tiefwasser-Ablagerung" (VISSER & MIRWALD 1998, S. 26). Diese „wurde mehrfach durch gröbere vom Beckenrand herstammende Schüttungen abgelöst" (VISSER & MIRWALD 1998, S. 26). Durch den Ablagerungsvorgang des aufgewirbelten Kalk- und Tonschlamms und gröberer Sandkörne sowie Fossilbruchstücke entstanden die massigen und gradierten Werksteinbänke, deren Gefüge durch die feinkörnige kalkig-tonige Matrix gekennzeichnet ist. Diese mehrmals hintereinander erfolgten allochthonen – fremdes gröberes Material vom Beckenrand enthaltenden – Schüttungen bewirkten die unterschiedlichen Werksteinhorizonte, deren obere Paol

(Ober-/Unter-Paol), Lappen und Flies sind. „Mit dem Flies endet die jeweilige Werksteinabfolge“, über der stets eine sehr markante Tonschicht (Flammenmergel) folgt. (VISSER & MIRWALD 1998, S. 27).
Da der Baumberger Kalksandstein nach der Ablagerung „nie größerem Druck und höherer Temperatur ausgesetzt war, konnte sich sein lockeres, feinporöses Gefüge erhalten“ (Visser & Mirwald 1998, S. 28). Dies machte den Werkstein zum einen zu einem „geschätzten, leicht zu bearbeitenden Bildhauerstein, begründet aber auch seine Verwitterungsanfälligkeit“ (Visser & Mirwald 1998, S. 28).
Aufgrund der nach der Ablagerung mehrfach erfolgten Schüttungen und Verwirbelungen sowie der fehlenden Verdichtung durch Druck und Temperatur ist häufig genug eine Schichtung an Handstücken des Gesteins makroskopisch nicht zu erkennen.

4.2 Kernmaterial historischer Werksteine

Aufgrund der relativ geringen Mächtigkeit der Abbaubauhorizonte in den Steinbrüchen, die sich wiederum in die jeweiligen Bänke – angesprochen als einzelne Varietäten – gliedern, können Unterschiede der Gefügeparameter und damit Gesteinseigenschaften von historisch zu heute verwendetem Material vermutet werden.
Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können, werden die Untersuchungen teilweise auch an „Kernmaterial historischer Werksteine“ durchgeführt (vgl. **Kapiteln 5**). Hierbei wird davon ausgegangen, dass das Innere des jeweiligen Werksteins nicht von der Bausteinverwitterung betroffen ist. Die Orientierung dieser Proben geht von einem Verbau mit horizontaler Ausrichtung der Foliation (Lager, Schichtung) des Gesteins aus. Eine Lineation lässt sich an diesen Proben nicht zuordnen.
nur um 10 bis 25 % reduziert wird.

5. Untersuchung an bruchfrischen Materialproben

(Birte Graue, LWL-DLBW)

In den folgenden Kapiteln werden Untersuchungen an bruchfrischem Material des Baumberger Kalksandsteins aus den aktuell zugänglichen Brüchen Fark und Dirks (vgl. Kapitel 4) vorgestellt. In früheren Publikationen (HELLMERS, 1987, KETTELHACK, 1988, BLÖCHL, 1993, VISSER & MIRWALD,1998) ist das Material in seinen verschiedenen Mikrofaziestypen, die an den unterschiedlichen Bauwerken in Westfalen-Lippe und darüber hinaus zu finden sind, bereits sehr ausführlich beschrieben. Ergänzend ermöglichen die hier von allen Projektpartner:innen durchgeführten Untersuchungen eine aktuelle und für die vorliegende Studie eindeutige Zuordnung der petrografischen und petro-physikalischen Eigenschaften des Natursteinmaterials sowie einen Vergleich mit „unverwittertem Kernmaterial" historischer Werksteinquader (vgl. Kapitel 5.4.12.4).

5.1 Mikroskopische Gefüge-Analysen

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Die Probenstücke aus den drei Varietäten wurden unter Vakuum mit blauem Kunstharz getränkt. Die Verwendung von blauem Harz verbessert die Erkennbarkeit von Poren, Hohlräumen und Rissen. Nach Aushärtung des Harzes erfolgte die Herstellung orientierter Dünnschliffe, an denen die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen durchgeführt wurden.
Im Polarisationsmikroskop (PolMi) können mineralische Bestandteile aufgrund ihres spezifischen lichtoptischen Verhaltens identifiziert und von anderen Materialien unterschieden werden.
Damit sind Untersuchungen mineralischer Systeme hinsichtlich zahlreicher Kriterien möglich. Natursteine können so anhand ihrer Gefüge (Modalbestand, Korngrößen und – formen, Bindungsverhältnisse, Porosität, Texturen) klassifiziert und identifiziert werden. Weiterhin können Materialveränderungen nachgewiesen werden: Gefügeentfestigungen, Mineralumwandlungen bzw. – neubildungen, Verdichtungen, Krusten, Salze etc. Die mikroskopische Auswertung zu diesen Kriterien wird im Folgenden an den drei Varietäten des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins exemplarisch ausgeführt.

Probe OP_1.13

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1418_001

Abb. 3: *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol".*

Abb. 4: *Detail aus* ***Abb. 3*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol".*

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1614_003

Abb. 5: *Detail aus* ***Abb. 3****: Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol"*

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1614_005

Abb. 6: *Detail aus* ***Abb. 5*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol"*

Beleuchtung:
Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 20M1614_009

Probe UP_4.3

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1615 001

Abb. 7: *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Unterpaol".*

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1615 003

Abb. 8: *Details aus* ***Abb. 7*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Unterpaol".*

Beleuchtung:
Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 20M1615 006

Abb. 9: *Details aus Abb. 7 Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Unterpaol".*

Beleuchtung:
Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 20M1615 012

Abb. 10: *Details aus* ***Abb. 7*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Unterpaol".*

Probe L_1.7

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1616 001

Abb. 11: *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Lappen".*

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1616 005

Abb. 12: *Detail aus* ***Abb. 11*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Lappen".*

Beleuchtung:
Polarisation; parallel

Bildnummer: 20M1616 008

Abb. 13: *Detail aus* ***Abb. 11*** *Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Lappen".*

Tab. 5: *Zusammenfassung der mikroskopischen Gefügeauswertung.*

Probe	Beschreibung	Untersuchungsergebnisse
OP_1.13	Bruchfrischer Baumberger Kalksandstein Varietät „**Oberpaol**"	• Modalbestand BKS: - überwiegend Kalk (meist Fossilbruchstücke), Größe aufgrund der Schalen- bzw. Bruchstück formen schwer bestimmbar - silikatische Körner (meist Quarz, Größtkorn: 0,1 mm), Glaukonit - Eisenoxid/-hydroxide (farbgebend) • miteinander „verbundene" Kalkbestandteile (meist schwach kompaktiert) • im PolMi keine BM-Phase erkennbar • Kapillarporosität vorhanden
UP_4.3	Bruchfrischer Baumberger Kalksandstein Varietät „**Unterpaol**"	• Modalbestand BKS: - überwiegend Kalk (meist Fossilbruchstücke), Größe aufgrund der Schalen- bzw. Bruchstück formen schwer bestimmbar - silikatische Körner (meist Quarz, überwiegend gut gerundet, Größtkorn: 0,15 mm), Glaukonit - Eisenoxid/hydroxide (farbgebend) • miteinander „verbundene" Kalkbestandteile (meist schwach kompaktiert) • im PolMi keine BM-Phase erkennbar • Kapillarporosität vorhanden ⇒ **etwas grobkörniger als Oberpaol**
L_1.7	Bruchfrischer Baumberger Kalksandstein Varietät „**Lappen**"	• Modalbestand BKS: - überwiegend Kalk (meist Fossilbruchstücke), Größe aufgrund der Schalen- bzw. Bruchstück formen schwer bestimmbar - silikatische Körner (meist Quarz, überwiegend

		gut gerundet, Größtkorn: 0,2 mm), Glaukonit - Eisenoxid/hydroxide (farbgebend) • miteinander „verbundene" Kalkbestandteile (meist schwach kompaktiert) • im PolMi keine BM-Phase erkennbar • Kapillarporosität vorhanden ⇒ **vergleichbar dem Unterpaol**

5.2 Rasterelektromikroskopische Untersuchung

(Birte Graue; LWL-DLBW)

Proben bruchfrischen Baumberger Kalksteins und solche aus verwitterten Objekten wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Die Hauptfragestellung war die Verteilung/Lokalisierung der Tonminerale im Gefüge-Kontext. Die Messungen wurden an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover durchgeführt.[4]

5.2.1 Methodik

Messgerät

Zur Visulisierung des Gefüges und der Gefügezusammensetzung sowie zur Detektion der element-mineralogischen Zusammensetzung der Proben wurden REM/REM-EDX-Analysen durchgeführt.

Probenpräparation

Die Proben wurden über einen Zeitraum von mind. 72 Stunden bei 150 °C getrocknet.

***Tab. 6**: Probenbeschreibung REM*

Probennummer	Probenbeschreibung
REM-BKS-LWL-001	bruchfrisches Steinmaterial Baumberger Kalksandstein, Unterpaol, Steinbruch Fark (UP-BF Far); Bruchstück von Stein UP 3.13
REM-BKS-LWL-002	bruchfrisches Steinmaterial Baumberger Kalksandstein, Oberpaol, Steinbruch Fark (OP-BF Far); Bruchstück von Stein OP 2.19
REM-BKS-LWL-003	bruchfrisches Steinmaterial Baumberger Kalksandstein, Lappen, Steinbruch Dirks (L-BF Dirks); Bruchstück von Stein L 2.1
REM-BKS-LWL-004	Geologische Bruchstelle, bruchfrisches Steinmaterial Baumberger Kalksandstein, Lappen, Steinbruch Dirks (L-BF Dirks); Bruchstück von Stein L 2.1
REM-BKS-LWL-005	Historisches Kernmaterial; aus dem inneren Bereich (Kernmaterial) eines historischen Werksteins aus Baumberger Kalksandstein, Haus Stapel, Torhaus
REM-BKS-LWL-006	Verwitterung: Schuppenbildung von historischem Werkstein aus Baumberger Kalksandstein, Haus Stapel, Torhaus (von REM-BKS-LWL-005)
REM-BKS-LWL-007	Verwitterung: Steinschale von historischer Schriftplatte aus Baumberger Kalksandstein (ähnlich wie REM-BKS-LWL-008 und REM-BKS-LWL-009)
REM-BKS-LWL-008	Verwitterung: Steinschale von historischer Schriftplatte aus Baumberger Kalksandstein (Nikolaikirche Münster-Wolbeck) (ähnlich wie REM-BKS-LWL-007 und REM-BKS-LWL-009)
REM-BKS-LWL-009	Verwitterung: Steinschale von historischer Schriftplatte aus Baumberger Kalksandstein (Nikolaikirche Münster-Wolbeck) (ähnlich wie REM-BKS-LWL-007 und REM-BKS-LWL-008)
REM-BKS-LWL-010	Verwitterung: Steinschale von historischer Figur aus Baumberger Kalksandstein (Christuskorpus)

[4] Die REM-Aufnahmen und EDX-Analyse wurden mit Unterstützung von Dr. Reiner Dohrmann, BGR, Hannover, durchgeführt.

5.2.2 Ergebnisse

Legt man die ausführlichen petrografischen Beschreibungen früherer Arbeiten (HELLMERS, 1987, KETTELHACK,1988; BLÖCHEL,1993; VISSER & MIRWALD, 1998) zugrunde, dann lassen sich die hier untersuchten Proben der Gefüge-Beschreibung „Wackestone", als glaukonitführender feinsandiger Biokalkarenit mit tonig-mikritischer Matrix (vgl. VISSER & MIRWALD, 1998, S. 30) zuordnen. Der Feinsand wird von VISSER & MIRWALD (1998, S. 30) angesprochen als eckige Quarzkörner mit Korngrößen (Durchmesser-Angaben) der Feinsandfraktion (63–200 µm), der Siltfraktion (2–63 µm) und der Tonfraktion (< 2 µm), die in der tonig-mikritischen Matrix „schwimmen".

Abb. 14: *: REM- Aufnahme Probe 005; tonig-mikritische Matrix: Matrix bestehend aus Calcit-Plättchen und fein verteilten Tonmineralen; turbiditische Ablagerungsbedingungen scheinen bis in die feine Matrix ablesbar.*

Die hier erfolgten REM-Untersuchungen zeigen ein poriges, matrixgestütztes Gefüge des Baumberger Kalksandsteins. Die Matrix besteht aus Calcit in Form von dicht geschichteten Plättchen und fein verteilten Tonmineralen (vgl. **Abb. 15 – Abb. 17**).

Abb. 15: *REM- Aufnahme Proben 001: offenporiges Matrix-Gefüge (Porendurchmesser 15-20 µm)*

Abb. 16: *REM- Aufnahme Probe 001: tonig-mikritische Matrix: Matrix bestehend aus Calcitplättchen und fein verteilten Tonmineralen*

Abb. 17: *REM- Aufnahmen Probe 001: Matrix aus Calcitplättchen, sehr feine Tonminerale (Pfeile) in der gesamten Matrix gleichmäßig verteilt b: Ausschnitt aus a.*

Das Element-Mapping nach Calcium spiegelt den hohen Anteil an Calcit wider (vgl. **Abb. 18 b**). Das Element-Mapping nach Silizium zeigt den in der gesamten Probe verteilten Quarz (vgl. **Abb. 18 c**). Ein Mapping nach Al, K oder Na gab keine Falschfarben, was die Abwesenheit derselben bedeutet und nahelegt, dass hier Quarz und kein Feldspat vorliegt.

Abb. 18: *REM- Aufnahmen Probe 002; a. Matrixgestütztes Gefüge Matrix b: Element-Mapping: Calcium; c: Element-Mapping: Silizium, d: Tonminerale in der gesamten Matrix gleichmäßig fein verteilt*

In der verwitterten Probe der Steinschale (vgl. **Abb. 19**) zeigt sich das Gefüge relativ heterogen, aber vor allem stark zerklüftet und rissig. Hier ist noch einmal deutlich zu erkennen, dass die Tonminerale matrixbildend sind.

Abb. 19: *REM- Aufnahme Probe 008: a. stark zerklüftete, grobkörnigere und rissige Matrix; b. Tonminerale sind fein verteilt und matrixbildend (c); d. Matrix aus Calcit und Tonmineralen*

5.2.3 Auswertung

Zusammengefasst zeigt die hier durchgeführte REM-Untersuchung ein heterogenes und matrixgestütztes Gestein mit feinkörnigen Klasten (Quarz und calcitische Klasten) und einem hohen Porenanateil, das in der tonig-mikritischen Matrix aus geschichteten Clacit-Plättchen und Tonmineralen turbiditische Ablagerungsbedingungen ablesen lässt.

Die Ausgestaltung der Matrix lässt verstehen, warum das Gestein keine sehr hohen Festigkeitswerte erreicht, zumal die hier untersuchten Proben Kornbindungen vermissen lassen, die jedoch für andere Varietäten des Baumberger Kalksandsteins beschrieben sind (GRIMM 1990, Taf. 145).
Die gemessene hohe Porosität (21,8–23,1 Vol.-%) mit dem Hauptporenanteil bei 1 – 0,1 µm (vgl. Kapitel 5.3.1) ist Hinweis auf geringe Festigkeiten (VISSER & MIRWALD, 1998, S. 30).
In Hinblick auf die Verwitterung bewirkt das Quellen und Schwinden der in der gesamten Matrix verteilten Tonminerale eine Zerrüttung des Gefüges. Gleichwohl ist vorstellbar, dass die hohe – ebenfalls fein verteilte – Porosität einen großen Teil der durch mechanischen Stress (Dehnungs- und Schwundereignisse) bedingten Gefügebewegungen abfangen kann. Mittelfristig führen diese allerdings zu einer grundlegenden und auch progressiven Schwächung der Matrix - in Form einer Materialermüdung.

5.3 Porenraumparameter

5.3.1 Porositätsmessungen/Porenraumverteilung

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Die Messungen erfolgten am Institut für Baustoffe der TU Dresden. Die Proben wurden bei 60° C im Trockenschrank bis Massekonstanz getrocknet und anschließend manuell in ca. 10 mm große Bruchstücke zerkleinert. Danach erfolgte die Bestimmung der Porosität und Porengrößenverteilung mit einer Gerätekonfiguration bestehend aus den Quecksilberdruckporosimetern PASCAL 140 (Druckbereich 0,013 MPa bis 0,3 MPa) und PASCAL 440 (Druckbereich 0,1 MPa bis 400 MPa). Die Auswertung in der **Tab. 7** enthält die Porositätskennwerte sowie eine Zusammenstellung der relativen Porenvolumina in den einzelnen Porenklassen. In den **Diagr. 1** – **Diagr. 2** sind die grafischen Darstellungen als Verteilungsdichtefunktion und in Form eines Histogramms jeweils kombiniert mit der kumulativen Kurve dargestellt. Alle Varietäten zeigen eine ähnliche Porenverteilung bzgl. Menge und Größe. mit einem hohen Anteil an Mikroporen 001-0,1 µm) sowie einem hohen Anteil an Kapillarporen (0,1 µm -1 mm). Es existieren Poren im Bereich von 0,1 µm bis etwa 1000 µm. Legt man die Einteilung von Klopfer (1985) zugrunde, umfasst der Kapillarporenbereich aller drei Varietäten 70-80% der Gesamtporosität.

Tab. 7: *Porositätskennwerte sowie eine Zusammenstellung der relativen Porenvolumina in den einzelnen Porenklassen*

Probenbezeichnung:		Probe OP	Probe UP	Probe L
Kumulatives Porenvolumen	[mm³/g]	114,51	104,00	99,11
Mediandurchmesser D_{50}	[µm]	0,430	0,549	0,423
Porosität	[Vol.-%]	23,15	21,88	20,83
Rohdichte	[g/cm³]	2,02	2,10	2,10
Reindichte	[g/cm³]	2,63	2,69	2,65
Porenbereich [Ø in µm]		Relatives Volumen [%]		
1000.0-562.3		0,00	0,00	0,00
562.3-316.2		0,00	0,00	0,00
316.2-177.8		0,00	0,00	0,00
177.8-100.0		0,00	0,25	0,14
∑ 1000 – 100	□	***0,00***	***0,25***	***0,14***
100.0-56.2		0,71	0,50	1,00
56.2-31.6		0,59	0,50	0,83
31.6-17.8		0,48	0,48	0,86
17.8-10.0		0,71	0,49	0,99
∑ 100 – 10	□	***2,49***	***1,97***	***3,68***
10.0-5.62		0,83	0,63	1,04
5.62-3.16		0,92	0,98	1,20
3.16-1.78		1,34	2,09	2,36
1.78-1.0		9,05	22,62	12,58
∑ 10 – 1	□	***12,14***	***26,32***	***17,18***
1.0-0.562		26,22	20,95	20,79
0.562-0.316		18,07	14,98	16,19
0.316-0.178		12,48	9,55	12,17
0.178-0.10		8,35	5,93	8,43
∑ 1 – 0.10	□	***65,12***	***51,41***	***57,58***
0.10-0.056		5,23	4,22	5,66
0.056-0.032		4,08	3,90	4,46
0.032-0.018		3,75	3,82	4,35
0.018-0.01		3,85	3,84	3,62
∑ 0,10 – 0,01	□	***16,91***	***15,78***	***18,09***
0.01-0.006		2,80	3,58	2,76
0.006-0.003		0,54	0,71	0,59
0.003-0.002		0,00	0,00	0,00
0.002-0.001		0,00	0,00	0,00
∑ 0,01 – 0,001	□	***3,34***	***4,29***	***3,35***

Diagr. 1: *Porengrößenverteilung (Porendurchmesser) der Varietät Unterpaol.*

Diagr. 2: *Porengrößenverteilung (Porendurchmesser) der Varietät Lappen.*

Diagr. 3: *Porengrößenverteilung (Porendurchmesser) der Varietät Oberpaol*

5.4 Wassertransporteigenschaften, Biegezugfestigkeit, statisches E-Modul und Ultraschallmessung /Bericht FH Potsdam

(Jeannine Meinhardt; FH Potsdam)

Im Rahmen des zu bearbeitenden Forschungsvorhabens ist die FH Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein beteiligt an den Objektuntersuchungen und der Schadensdefinition. Sie ist zuständig für die Auswahl und Validierung von zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden zur Entwicklung eines Untersuchungsprogramms im MODUL : ERKENNEN. Da sich bei der Bereisung der ausgewählten Objekte im Mai 2019 (Horstmar, Haus Alst sowie Havixbeck, Haus Stapel und Kreuzigungsgruppe) gezeigt hat, dass die Verwitterungsphänomene an konservierten und auch nicht konservierten Gesteinen ähnlich sind, wurde der Fokus zunächst auf die Erfassung petrophysikalischer Basiskennwerte der verschiedenen unverwitterten Varietäten des Baumberger Kalksandsteins, Oberpaol, Unterpaol, Lappen, gelegt. Das bruchfrische Probenmaterial wurde der FH Potsdam durch Robert Wennemer zur Verfügung gestellt und durch den LWL postalisch übersandt. An diesen Quadern bzw. an daraus gewonnen Probekörpern sind standardisierte Messungen bezüglich einiger Festigkeits- und Feuchteparameter durchgeführt worden. Damit kann eine wichtige Bewertungsgrundlage für die Veränderungen an exponierten und konservierten Gesteinen der entsprechenden Varietäten zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin sind die Untersuchungsmethoden, insbesondere die Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme mittels Karstenschem Prüfröhrchen, genau und nachvollziehbar beschrieben, um zu gewährleisten, dass im Rahmen des Projekts alle beteiligten Partner perspektivisch in gleicher Weise messen und auswerten.

5.4.1 Probematerial

Für die Messungen wurden Proben der drei Varietäten mit folgender Probenkonfiguration genutzt und von der Arbeitsgruppe der FH Potsdam präpariert.
Aus allen drei Quadern wurden jeweils vier Bohrkerne entnommen, jeweils zwei parallel und zwei senkrecht zur Schichtung. Die entsprechenden Probenentnahmestellen sind durch Kreise in der **Abb. 20** gekennzeichnet.

Abb. 20: *Quader der drei Varietäten des Baumberger Kalksandsteins – Oberpaol (OP), Unterpaol (UP) und Lappen (L). Die Kreise markieren die Stellen, an denen die Bohrkerne für die petrophysikalischen Messungen entnommen worden sind.*

Hinsichtlich der Ausrichtung der Bohrkerne in den Quadern gilt nach Aussage von Robert Wennemer M. A., der die Quader in den jeweiligen Steinbrüchen besorgt hat, folgendes: Die Varietäten Oberpaol und Unterpaol stammen aus dem Steinbruch Fark. Die in **Abb. 20** gezeigten Oberseiten der

Quader (Beschriftung OP 2.7 und UP 4.5) repräsentieren das Lager (Oberseite). Die aus diesen Flächen gezogenen Bohrkerne sind parallel zur Schichtung angelegt (OP1 und OP2 sowie UP1 und UP2). Die Varietät Lappen stammt aus dem Steinbruch Dirks. Das Material ist im rechten Bild in **Abb. 20** gezeigt. Die obenliegende Längsfläche mit der Beschriftung 1.4 entspricht dem Lager, und zwar die Unterseite. Aus dieser Fläche sind durch die FHP die Bohrkerne L1 und L2 entnommen worden. Diese repräsentieren somit die Verhältnisse parallel zur Schichtung. Die Bohrkerne L3 und L4 an der Stirnseite desselben Quaders stehen senkrecht dazu und repräsentieren das Material senkrecht zur Schichtung. Zur besseren Übersicht der Ausrichtung der verschiedenen Bohrkerne sind diese in **Tab. 8** noch einmal einzeln aufgeführt. In **Abb. 21** sind die Ausdrücke senkrecht und parallel zur Schichtung visualisiert. Bei einer Ausrichtung parallel zur Schichtung spiegelt jede Bohrkernscheibe die Schichtung wider (siehe **Abb. 21**). Damit ist von relativ homogenen Gefügeverhältnissen auszugehen. Im Fall der Ausrichtung senkrecht zur Schichtung spiegelt jede Bohrkernscheibe zumindest theoretisch mehrere Schichten wider. Daher ist das Gefüge erwartungsgemäß heterogener. Insgesamt ist die Schichtung an allen drei betrachteten Varietäten des Baumberger Kalksandsteins nur sehr schwach ausgeprägt, weshalb auch keine starke schichtungsabhängige Anisotropie zu erwarten ist.

Abb. 21: *Darstellung der Bohrkerne in Bezug auf die Schichtung der Gesteinsquader. Links ist die Ausrichtung parallel zur Schichtung und rechts senkrecht dazu.*

Tab. 8: *Überblick der Ausrichtung der entnommenen Bohrkerne bezogen auf die Schichtung des jeweiligen Gesteinsquaders (bezogen auf die Darstellung **Abb. 21**).*

Bohrkernbezeichnung	Varietät	Ausrichtung des Bohrkerns bezogen auf die Schichtung des Gesteins
OP 1	Oberpaol	parallel
OP 2	Oberpaol	parallel
OP 3	Oberpaol	senkrecht
OP 4	Oberpaol	senkrecht
UP 1	Unterpaol	parallel
UP 2	Unterpaol	parallel
UP 3	Unterpaol	senkrecht
UP 4	Unterpaol	senkrecht
L 1	Lappen	parallel
L 2	Lappen	parallel
L 3	Lappen	senkrecht
L 4	Lappen	senkrecht

Insgesamt sind 12 Bohrkerne aus den drei Quadern gezogen worden (siehe **Abb. 22** links), aus denen wiederum jeweils 5 Bohrkernscheiben (siehe **Abb. 22** rechts) für weitergehende Untersuchungen gewonnen wurden.

***Abb. 22**: Bohrkerne aus den Quadern Oberpaol, Unterpaol und Lappen (links) und jeweils 5 Bohrkernscheiben aus jedem Bohrkern für die Messung der µ-Werte und der biaxialen Biegezugfestigkeit/E-Modul.*

An den Quadern selbst sind Messungen der kapillaren Wasseraufnahme mittels dem Karstenschen Prüfröhrchen erfolgt. An den Bohrkernen (Durchmesser 4,6 cm) wurden Ultraschallmessungen durchgeführt. Nachfolgend sind diese in Scheiben (5 mm) gesägt und der Bestimmung der Wasserdampfdiffusion sowie der biaxialen Biegezugfestigkeit/E-Modul zugeführt worden.

5.4.2 Methodik

In diesem Kapitel ist das Vorgehen bei den verschiedenen Messungen genau verzeichnet, um die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Ermittlung der w-Werte, mit dem Karstenschen Prüfröhrchen und nach DIN, sowie der Wasseraufnahmekapazität (WAK). Ein Ziel des vorliegenden Projekts, in dem es u.a. darum geht, einen standardisierten Untersuchungskanon für die Bewertung von Baumberger Kalksandsteinen aufzuzeigen, ist, innerhalb der Arbeitsgruppe verbindliche Mess- und Auswertemodi zu nutzen und anschließend auch zur Verfügung zu stellen.

5.4.3 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekapazität

Die Kenntnis der kapillaren Wasseraufnahme ist für die Zustandsbeurteilung von Objekten von großem Interesse. Mit Hilfe der daraus abgeleiteten Informationen können u. a. Aussagen im Zusammenhang mit der Effektivität von Hydrophobierungen bzw. zur Identifizierung, inwieweit überhaupt eine hydrophobierende Behandlung erfolgt ist, getroffen werden. Die kapillare Wirkung eines Materials orientiert sich an dessen Porosität. Poren bzw. Kapillaren mit einem Radius zwischen 100–0,01 µm sind für die Kapillarität eines Materials zuständig. Im Bereich >100 µm finden kaum messbare kapillare Vorgänge statt, sondern hauptsächlich die Sickerströmung und auch Wasserdampfdiffusion. Auch die Mikroporen (< 0,01 µm) sind nicht in der Lage, kapillar Feuchte zu transportieren. In dem Bereich erfolgt Kapillarkondensation und Lösungsdiffusion. Einschlägige Kenngrößen der Wasseraufnahme sind zum einen der Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/(m²√h)], der Wassereindringkoeffizient B [cm/√h] und die Wasseraufnahmekapazität WAK [Vol.-%], die mathematisch miteinander verknüpft sind. Beschrieben wird dies nach SCHWARZ (1972) wie folgt:

Wasseraufnahmekoeffizient:

$$m_w = A * \sqrt{t} \qquad w = \frac{Wfl}{\sqrt{t}} \qquad (5.4.1)$$

Wassereindringkoeffizient:

$$x = B * vt \qquad B = \frac{x}{\sqrt{t}} \qquad (5.4.2)$$

Wasseraufnahmekapazität:

$$B = \frac{A}{\psi k * \rho w} \qquad WAK = \frac{w}{B + \rho w} \qquad (5.4.3)$$

Erläuterung:

w ≙ A:	Wasseraufnahmekoeffizient
W ≙ m:	flächenbezogene Wasseraufnahme
B:	Wassereindringkoeffizient
t:	Zeit
WAK ≙ ψk:	Wasseraufnahmekapazität
ρ_w:	Dichte Wasser [1 g/cm³]

Abb. 23: *Schematische Darstellung der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 15148* am *Bohrkern. (Quelle: P. Kozub)*

Die Kenngrößen lassen sich mit Exaktheit nur durch Labormessungen an Objektproben definierter Geometrie nach einschlägigen Normen bestimmen (DIN EN ISO 15801) (vergl. **Abb. 23**)[5].
Diese Messungen sind an insgesamt 6 Bohrkernen erfolgt, jeweils zwei (parallel und senkrecht zur Schichtung angelegt) der drei Varietäten (Oberpaol, Unterpaol und Lappen). An diesen Bohrkernen ist jeweils auch die Wasseraufnahmekapazität bestimmt worden.

[5] Gefertigt von P. Kozub für das 2. Arbeitstreffen der WTA-Arbeitsgruppe Wasseraufnahme, „Wasseraufnahmekoeffizient. Theoretische Überlegungen" in Potsdam am 25-26.09.2017.

5.4.3.1 Bestimmung der Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148

Die DIN EN ISO 15148:2016-12 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen" (früher: DIN 52617) ist eine für das Bauwesen erarbeitete Norm zur Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme poröser Baustoffe. Die in dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen an Bohrkernen lehnen sich an diese Norm an. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen: Die Prüfkörper wurden bis zur Massekonstante getrocknet, seitlich mit Parafilm M® zur exakten Begrenzung der Saugfläche abgedichtet und die Trockenmasse ermittelt. In einem flach mit Wasser gefüllten Gefäß wurde der Körper mit seiner Saugfläche auf ein Kunststoffgitter gestellt und die Zeitmessung begonnen. In regelmäßigen Abständen wurde der Probekörper gewogen und die verstrichene Zeit notiert. Hierbei wird vor jeder Wägung nicht aufgenommenes Wasser mit einem mattfeuchten Schwammtuch von der Saugfläche abgetupft. Die Messung erfolgte jeweils 60 Minuten bzw. bis der Feuchtehorizont die Oberfläche des Prüfkörpers durchbricht. Um den Kennwert der Wasseraufnahmekapazität zu ermitteln, wurde die Prüfung zusätzlich bis zur vollständigen Durchfeuchtung des Probekörpers fortgeführt (siehe nachfolgendes Kapitel).

Die so erhobenen Daten werden wie folgt ausgewertet:

Dabei ist m_t - Masse zu Zeitpunkt t [kg], m – Ausgangsmasse [kg], A - Saugfläche [m^2] Alle Δm werden über √t in Punkten in einem Graph aufgetragen Dabei ist t – Wägezeitpunkt [sec].

Aus den Werten von Δmt wird ein w-Wert zum jeweiligen Zeitpunkt t berechnet. Anhand dieser Werte wird ein allgemein gültiger w-Wert zunächst abgeschätzt. Ein linearer Graph (f(x)=a·x+b)) wird auf Grundlage dieses abgeschätzten w-Wertes erstellt, wobei der w-Wert der Steigung des Graphen und √t dem Wert x entspricht. Durch Variieren der Steigung und der Achsenverschiebung b wird der Graph so lange angepasst, bis dieser möglichst genau auf den zuvor aufgetragenen Punkten liegt. Aus dem optimierten Graphen lässt sich nun auf einen allgemeinen w-Wert für diese Messung schließen. Da üblicherweise das Anfangssaugverhalten einen überhöhten w-Wert abbildet, können ein Start-w-Wert und ein Verlaufs-w-Wert differenziert werden. In der folgenden Auswertung wurde sich auf den Verlaufswert bezogen.

5.4.3.2 Bestimmung der Wasseraufnahmekapazität

Im Zuge der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 wurde zusätzlich die Wasseraufnahmekapazität (WAK) bestimmt. Hierzu wurde der Probekörper so lange in

der Prüfanordnung belassen, bis die komplette Probekörperoberfläche feucht erscheint. Durch Wägung wird die zu diesem Zeitpunkt aufgenommene Wassermenge bestimmt (m_{nass}). Die Wasseraufnahmekapazität wurde nach folgender Formel berechnet:

$$WAK_{(Vol.-\%)} = \frac{m_{nass} - m_{trocken}}{V_{Probekörper}} \qquad (5.4.4)$$

Wasseraufnahmekapazität wurde nach folgender Formel berechnet:

Darüber hinaus erfolgte die Messung der kapillaren Wasseraufnahme zerstörungsfrei mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN.

5.4.4 Wasseraufnahme nach Karsten

Das Prüfröhrchen nach Karsten besteht aus einem nach einer Seite offenem und mit einem flachen Rand versehenen Glaszylinder, der an der Objektoberfläche aufgekittet wird (z. B. Sanitärkitt plastic-fermit oder Karosseriedichtstoff Terrostat IX), und einem gradierten Rohr, an dessen Skala im Verlauf der Messung die aufgenommene Flüssigkeitsmenge in ml abgelesen wird (siehe **Abb. 24**). Nach dem Aufkitten wird die Vorrichtung über das gradierte Messrohr zügig mit einer Spritzflasche bis zur Linie von 0 ml mit deionisiertem Wasser befüllt und die Stoppuhr gestartet. Nachfolgend werden in beliebigen Zeitabständen die aufgenommenen Wassermengen in ml und die dazugehörigen Eindringzeiten in Minuten und Sekunden dokumentiert.

Abb. 24: *Karstensches Prüfröhrchen mit einem Glockendurchmesser von 45 mm.*

Für die Auswertung der Messdaten wurde das Programm Calkarow in der aktuellen Version 3.2 von Wendler und Pfefferkorn (Tabellenkalkulation Microsoft Excel®) verwendet. Das Programm basiert auf der Annahme einer gleichmäßigen, richtungsunabhängigen Flüssigkeitsausbreitung im porösen Gefüge gemäß Kapillargesetzmäßigkeit. Hierdurch bildet sich ein Durchfeuchtungskörper aus, dessen Geometrie idealisierend als Zentralzylinder mit umgebendem Vierteltorus angenommen wird (siehe **Abb. 25**)[6].

Abb. 25: *Durchfeuchtungskörper bei aufgesetztem Karstenschen Prüfröhrchen idealisierend als Zentralzylinder mit umgebendem Vierteltorus angenommen. (Quelle: P. Kozub)*

Die Verteilung des Wassers im porösen Material bei aufgesetzten Karstenröhrchen ist in der Literatur nach NIEMEYER (2011) folgendermaßen beschrieben:

[6] Gefertigt von P. Kozub für das 2. Arbeitstreffen der WTA-Arbeitsgruppe Wasseraufnahme, „Wasseraufnahmekoeffizient. Theoretische Überlegungen" in Potsdam am 25-26.09.2017.

[7]

$$V_{Dkar} = \underbrace{\pi \cdot r^2 \cdot x}_{\text{Zylinder}} + \underbrace{\frac{\pi^2 \cdot r \cdot x^2}{2} + \frac{2 \cdot \pi \cdot x^2}{3}}_{\text{¾ Torus}} \qquad (5.4.5)$$

Mittlerweile konnte für einige Gesteine gezeigt werden, dass sich die Wasserkörper im Gefüge, je nach Abhängigkeit von der Porosität, in anderer Form, eher elipsoid ausbreiten. Eine erste Bachelorarbeit zu diesem Thema wurde an der FH Potsdam in Kooperation mit Dr. Eberhard Wendler angefertigt (QUARIUS, 2019).

5.4.5 Abhängigkeiten der Messung mit dem Karstenschen Prüfröhrchen

Da bei der Erfassung des Wasseraufnahmekoeffizienten die Wasseraufnahme einer Fläche über die Zeit bestimmt wird, spielt die Größe der Messfläche eine entscheidende Rolle bei der Messung. Das Karstensche Prüfröhrchen wird mit einem Kittring auf der Objektoberfläche befestigt. Die Präparation des Röhrchens bzw. die Dicke des Kittes hat einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Daher darf bei der Berechnung des w-Wertes, z.B. nach Calkarow, nicht der Durchmesser des verwendeten Glasröhrchens eingegeben werden, das für die Messung benutzt worden ist, sondern die Öffnung, die der abgenommene Kittring als Messfläche markiert. Allerdings ist es in der Praxis häufiger nicht möglich, den Kittring nach der Messung intakt abzuziehen und die Saugfläche nachträglich zu erfassen, da ein Teil des Kittes an der Fassade haften bleibt und extra abgenommen werden muss. Dann ist es umso wichtiger, dass keine zu massive Kittwulst in den Innenbereich des Röhrchens geragt hatte und die Messfläche einschränkte. In der aktuellen WTA-Arbeitsgruppe „Kapillare Wasseraufnahme" (WTA, Referat 3) unter Leitung von Dr. Eberhard Wendler wird ausschließlich das großformatige Karstenröhrchen verwendet und als geeignet im entstehenden Merkblatt beschrieben. Eine große Prüffläche reduziert den Randeinfluss und stellt repräsentativere Ergebnisse zur Verfügung. Es gibt auch kleinere Röhrchen, die allerdings mit Hinblick auf die Präparation aufgrund der kleinen Messfläche deutlich fehleranfälliger sind. Eine exemplarische Prüfung der Saugfläche auf einem transparenten Untergrund führte beim Karsten-Röhrchen im Mittel zu einer Reduktion der Saugfläche um 15 Prozent bei ± 10 Prozent Abweichung (HAINDL, et al., 2016).
Eine weitere wichtige Abhängigkeit der Messung besteht in deren Zeitpunkt. Nach einem Regenereignis ist ein Teil der kapillaraktiven Poren bereits mit Wasser gefüllt. Dieser Umstand kann je nach Porosität des Gesteins selbstverständlich einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Karstenmessung haben. Im Wesentlichen sind bei einer Messung nach einem Regenguss geringere w- Werte zu erwarten, da die Poren bereits anteilig mit Wasser gefüllt sind. Daher sollen die Messungen unbedingt mit mehrtägigem Abstand zu vergangenen Regenschauern, an trockenen Tagen erfolgen. Dieser Umstand spielt insbesondere für vergleichende Messung im Rahmen eines Monitorings, z. B. bezüglich der Wirksamkeit einer Hydrophobierung, eine entscheidende Rolle. *Die Porosität steuert erheblich die Trocknungsgeschwindigkeit, so dass je nach Gestein auch mehrere Tage nach einem Starkregenereignis noch eine zu hohe Feuchte im Porenraum vorliegen kann* (HAINDL, et al., 2016). Haindl (20216) stellte an Putzflächen fest, dass sich auch die Tageszeit der Messung erheblich auf die Wasseraufnahme auswirkt. Je nachdem, ob die Messung vormittags oder nachmittags durchgeführt wurde, waren die Ergebnisse auch sehr verschieden. Vermutet wurde, dass aufgrund der nächtlichen Betauung die Oberfläche der Westfassade vormittags noch so feucht ist, dass die

[7] Gefertigt von P. Kozub für das 2. Arbeitstreffen der WTA-Arbeitsgruppe Wasseraufnahme, „Wasseraufnahmekoeffizient. Theoretische Überlegungen" in Potsdam am 25-26.09.2017.

Wasseraufnahme knapp 40% niedriger blieb als am selben Tag nachmittags. Um diese Abhängigkeit möglichst auszuschließen, sollte bei einem Monitoring dieser Zusammenhang berücksichtigt werden.

In der bereits oben erwähnten WTA-Arbeitsgruppe „Kapillare Wasseraufnahme" ist der Einfluss des hydrostatischen Druckes auf die kapillare Wasseraufnahme thematisiert worden. Die 10 cm Wassersäule über der Wasserfläche geht ungefähr mit einem Druck von 10^{-2} bar einher und soll den Druckanfall im Schlagregenfall simulieren. Allerdings kann der unter Wind „angepresste" Regen tatsächlich nur im Großporenbereich (Sickerwasserströmung) relevanten Einfluss nehmen. Eine im Zuge der Wasseraufnahme abnehmende Wassersäule geht mit einem geringeren hydrostatischen Druck einher. In der Arbeitsgruppe ist für die Messung mit dem Karstenschen Prüfröhrchen verbindlich geklärt worden, dass das Röhrchen während der Messung trotz des wahrnehmbaren Einflusses, insbesondere bei stärker saugenden Materialien, nicht wieder aufgefüllt werden soll. Die Messung erfolgt anhand eines einmal zur Nulllinie aufgefüllten Röhrchens mit dem Start der Messuhr. Zwischendrin wird kein deionisiertes Wasser nachgefüllt. Aus dieser Prozedur können sich möglicherweise Ablesefehler ergeben, die besser auszuschließen sind.
Die Dauer der Karstenmessung richtet sich nach der Saugfähigkeit des Materials. Ein wesentlicher Anteil des kapillaren Saugens erfolgt meist in den ersten zehn Minuten der Messung. Bei stark saugenden Materialien ist bereits nach wenigen Minuten das Messröhrchen leer gesaugt und es bestehen Probleme, überhaupt die Messung zu dokumentieren. Generell, aber insbesondere bei langsam saugenden Materialien, ist eine Messung über 60 Minuten anzustreben.

Die Auswertung der Messung mit dem Karstenschen Prüfröhrchen erfolgt nach dem $\sqrt{t}$-Gesetz mit einem der beiden Microsoft Excel basierten Auswerteprogrammen nach Calkarow oder Niemeyer (D'HAM et al., 2010). Sowohl die Erfassung der Messwerte als auch deren Auswertung sollten nur mit Sachkenntnis erfolgen, da ansonsten nicht belastbare Ergebnisse das Resultat sein können. Um die Wasseraufnahme an der jeweiligen Messstelle überhaupt zu verstehen und um zu eruieren, ob für die Messung tatsächlich nur ein einziger w-Wert das passende Charakteristikum sein kann oder ob für das erfasste Tiefenprofil eventuell zwei oder sogar drei verschiedene Kennwerte angenommen werden, sollte die Messkurve der Wasseraufnahme über die Zeit generell zunächst graphisch dargestellt werden. Jeder markante Anstiegswechsel in der Messkurve gibt einen Hinweis darauf, dass nicht alle erfassten Wertepaare im Rahmen einer Auswertung berücksichtigt werden können. Weiterhin wird für die Auswertung die Wasseraufnahmekapazität benötigt. Entweder muss diese zuvor an einer zur Verfügung stehenden vergleichbaren Gesteinsprobe ermittelt werden, wie im Rahmen dieses Projekts erfolgt, oder es muss eine realistische Abschätzung erfolgen. Auch hier ist Fachkenntnis vorausgesetzt. Gleiches gilt für die in diesem Rahmen erforderliche Abschätzung des b-Werte Bereichs. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Auswertung korrekt ermittelter Daten letztlich doch noch zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann, wenn nicht geeignete Daten miteinander verwendet werden.

5.4.6 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Mirowski

Der Kapillartränkungsprüfer nach Mirowski besteht aus einem gradierten Röhrchen, dessen oberes Ende luft- und flüssigkeitsdicht geschlossen und dessen offenes unteres Ende um 90° gekrümmt ist (D'HAM et al., 2010). Nach der Wasserbefüllung des Röhrchens mittels Spritzflasche wird in das offene Ende ein kreisrundes, gut getränktes Schwämmchen als Leitungsventil gesteckt. Das Schwämmchen wird dann in Kontakt mit der Objektoberfläche gebracht. Entzieht diese dem Schwämmchen Flüssigkeit, so entsteht ein Unterdruck im Röhrchen. Der Druckausgleich erfolgt durch Luftzufuhr durch das Schwämmchen und manifestiert sich durch das periodische Aufsteigen von Luftblasen im Röhrchen. Hierdurch sinkt dessen Flüssigkeitsspiegel. An der Röhrchenskala kann die zeitabhängig aufgesaugte Flüssigkeitsmenge wie

beim Karstenröhrchen an der Phasengrenze Luft/Flüssigkeit abgelesen werden. Infolge der kapillaren Wasseraufnahme bildet sich von Messbeginn an ein Feuchtefleck um das Schwämmchen. Aus dessen Durchmesser lässt sich auf den Wasseraufnahmegrad bzw. die Richtung der Flüssigkeitsaufnahme schließen. Es ist darauf zu achten, dass das Schwämmchen etwa 1 bis 2 mm aus der Röhrchenmündung hervorsteht (D'HAM et al., 2010). Neben der Protokollierung der zeitabhängig aufgenommenen Flüssigkeitsmenge wurde gelegentlich auch der Durchmesser des Feuchteflecks ermittelt. Es kam sowohl deionisiertes Wasser als auch Siedegrenzbenzin zum Einsatz (unterschiedliche Mirowski-Röhrchen). Da die Wasseraufnahme sehr gering war, erschien es sinnvoll, zusätzliche Messungen mit einem organischen Lösemittel durchzuführen. Da es sich allerdings bei den zur Verfügung gestellten Blöcken der drei verschiedenen Baumberger Kalksandstein-Varietäten um unbehandeltes Gestein handelt, steht eigentlich nicht zu prüfen, ob bei sehr geringer Wasseraufnahme der Oberfläche eventuell eine Hydrophobierung dafür verantwortlich ist. Dieser Umstand ist nämlich mit dem Testbenzin zu prüfen, in dem Sinne, dass eine hydrophobierte Oberfläche aufgrund der Offenporigkeit organisches Lösungsmittel aufnehmen würde. Wasser würde im Falle der Hydrophobierung weder im abgedichteten, noch im offenporigen Zustand aufgenommen werden.
Die Eindringtiefe x wird aus dem Durchmesser des Durchfeuchtungshofes nach der Formel:

$$x = \frac{\emptyset\, Feuchtefleck - \emptyset\, Schwämmchen}{2} \tag{5.4.6}$$

abgeleitet. Setzt man das Durchfeuchtungsvolumen (V0) zum aufgenommenen Flüssigkeitsvolumen (Fv) in Bezug, erhält man die volumenbezogene Flüssigkeitsaufnahme-kapazität Fv nach der Formel:

$$F_v = \frac{Vf + 100}{VO} \tag{5.4.7}$$

5.4.7 Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands

Die Messungen wurden im wet-cup Verfahren durchgeführt. Für die Präparation der Messanordnung war das Schneiden von Bohrkernscheiben erforderlich. In Anlehnung an die Anforderungen der biaxialen Biegezugfestigkeit, der die Proben im Anschluss zugeführt worden sind und die eine Dicke der Bohrkernscheiben von 10% des Durchmessers erfordern, wurden die Scheiben auf 5 mm Dicke zurechtgeschnitten. Im Anschluss an den Sägevorgang sind die Scheiben gereinigt, getrocknet bzw. konditioniert worden (20 °C / 60% rel. Luftfeuchte). Insgesamt wurden 12 Bohrkernscheiben der drei Varietäten des Baumberger Kalksandsteins untersucht. Auch hierbei wurden wieder sowohl die Ausrichtung parallel als auch senkrecht der Schichtung der Gesteinsquader beachtet. Pro Bohrkern erfolgte die Untersuchung an zwei Scheiben. Die Probenpräparation im wet-cup Verfahren sieht nach DIN 52615 vor, dass eine Bohrkernscheibe luftdicht auf ein mit Wasser gefülltes Gefäß aufgebracht wird. Dafür wird die Bohrkernscheibe zunächst randlich mit einem Wachsband abgedichtet und anschließend wird mit flüssigem Wachs über diesen abgedichteten Rand mitdem Gefäß luftdicht verbunden (siehe **Abb. 26**). Diese Messanordnung wird zu Beginn der Messungen gewogen, um das Anfangsgewicht zu ermitteln.

Diese Messanordnung wird zu Beginn der Messungen gewogen, um das Anfangsgewicht zu ermitteln.

Abb. 26: *Präparierte Proben zur Ermittlung des µ-Wertes (wet-cup) im Klimaschrank.*

Wasserfläche in dem dichten Probegläschen. Durch die luftdichte Anbindung der Bohrkernscheiben an das Gefäß kann der Wasserdampf nur durch das Gesteinsmaterial diffundieren und äußert sich in dem Gewichtsverlust des Probegläschens, das regelmäßig gewogen wird. Ab dem Zeitpunkt, an dem sich

mehr oder weniger ein konstanter Masseverlust einstellt, ist die Messung beendet und der µ-Wert kann errechnet werden. Erfahrungsgemäß werden die Messungen über einen Zeitraum von ca. 14 Tagen durchgeführt, ehe der µ-Wert errechnet wird. Der Messzeitraum im vorliegenden Fall lag zwischen dem 27.02.2020-17.03.2020.
Mittels folgender Formel kann der µ-Wert im Anschluss an die Versuchsdurchführung mit regelmäßiger Wägung errechnet werden:

$$\mu = \delta_L * ps * \Delta a * At / s * \Delta m \qquad (5.4.8)$$

δ_L: 1.96 E-10 kg / Pa m s (Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient)
ps: 2.49 E+03 Pa (Partialdruck der gesättigten Luft
Δa: Differenz der relativen Feuchte
A: Prüffläche
Δt: Zeitspanne zwischen erster und abschließender Wägung [h]
A: Prüffläche
Δm: Massendifferenz zwischen erster und abschließender Wägung
s: Probendicke [m]

5.4.8 Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit und des statischen E-Moduls

An den bereits für die Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes präparierten Bohrkernscheiben sind im Anschluss an diese Messungen die biaxiale Biegezugfestigkeit und der E-Modul ermittelt worden. Die Messungen erfolgten an jeweils drei Bohrkernscheiben pro Bohrkern. Insgesamt sind 6 Bohrkerne berücksichtigt worden, pro Varietät und Lagerungsverhältnisse (parallel und senkrecht zur Schichtung) jeweils ein Bohrkern (18 Proben). Die Ergebnisse repräsentieren somit eine verlässliche Datengrundlage, auf der die Errechnung von Mittelwerten für die biaxiale Biegezugfestigkeit und den E-Modul für die drei Varietäten möglich ist.

5.4.9 Ultraschallmessung

Die Grundzüge des Ultraschallverfahrens werden beschrieben in DIN EN 14579 „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung" (2005) und im Merkblatt B4 „Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile" der DGzfP (1999).
Ultraschall ist eine mikromechanische Schwingung, die sich als Welle in festen, flüssigen und gasförmigen Medien ausbreitet. Die Messfrequenzen beginnen oberhalb des hörbaren Schallbereiches bei 20 kHz und sind bei Naturstein bis etwa 1 MHz für Untersuchungen nutzbar.
Schallwellen breiten sich in unterschiedlichen Bewegungsformen im Gestein aus und werden dementsprechend auch unterschiedlich stark gedämpft. Die wichtigste Wellenform ist die Stoßwelle bzw. Longitudinalwelle (nach ihrer Schwingungsrichtung) oder Primärwelle (p-Welle), die in der Regel die schnellste Welle darstellt. Die p-Wellengeschwindigkeit für Durchschallungs- oder Transmissionsmessungen berechnet sich wie folgt:

$$vp = \frac{l}{t} \tag{5.4.9}$$

v_p = p-Wellengeschwindigkeit
l = Messstrecke [cm]
t = Laufzeit der p-Welle [µs]

Die Messungen der p-Wellengeschwindigkeit (v_P) erfolgte an den Bohrkernen der drei verschiedenen Varietäten des Baumberger Kalksandsteins mit Ultraschallwandlern, deren Spitzen trocken auf die Materialoberfläche aufgesetzt werden. Als Geberfrequenz wurde 350 kHz gewählt.

Der Messvorgang bestand aus einer Streckenmessung mittels einer digitalen Schieblehre sowie der eigentlichen Laufzeitmessung mit dem Ultraschalllaufzeitmessgerät (verstärkt). Dessen Bestandteile sind ein Ultraschallgenerator, ein Ultraschallgeber, ein Ultraschallempfänger und ein Oszilloskop zur Zeitmessung). Die p-Welle markiert sich im Ersteinsatz der Wellenfront und wird an diesem Punkt gemessen (Laufzeit).
Mit Hinblick auf die Feuchteabhängigkeit der Ultraschallmessung wurden die Proben vor der Messung konditioniert (20°C/60% rel. Luftfeuchte).
Im Rahmen des Projekts sollten für die drei Varietäten repräsentative Ultraschallgeschwindigkeiten des unverwitterten Materials ermittelt werden. Dafür sind insgesamt 6 Bohrkerne untersucht worden, zwei von jeder Varietät. Dabei wurde erneut darauf geachtet, dass sowohl die Ausrichtung parallel als auch senkrecht zur Schichtung Berücksichtigung fand. Pro Bohrkern wurden 8 Einzelmessungen ausgeführt.

In
Abb. 27 ist die Verteilung der Messpunkte an den Bohrkernen gezeigt. Ist der Bohrkern senkrecht zur Schichtung ausgerichtet (siehe , links), dann liegen jeweils vier Messpunkte senkrecht zur Schichtung (gelbe Markierungen,
Abb. 27 , links) und vier parallel dazu (grüne Markierungen,
Abb. 27 , links). Das betrifft im Fall der Ultraschallmessungen die Bohrkerne OP 3, UP 3 und L3. Bei Ausrichtung des Bohrkerns parallel zur Schichtung (OP 1, UP 1 und L1) liegen sowohl die gelben als auch die grünen Messpunkte (siehe,
Abb. 27 rechts) parallel zur Schichtung. Sie sollten zumindest theoretisch nahezu identisch sein.

Abb. 27: Verteilung der Messpunkte an den Bohrkernen. Links: Ausrichtung senkrecht zur Schichtung; rechts: Ausrichtung des Bohrkerns parallel zur Schichtung

5.4.10 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der verschiedenen petrophysikalischen Untersuchungen an den drei untersuchten Varietäten dargestellt.

5.4.10.1 Ergebnisse zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekapazität

An den Probequadern der drei Baumberger Sandsteinvarietäten sind jeweils vier Messungen mit dem Karstenschen Prüfröhrchen erfolgt. In diesem Zusammenhang sind die w-Werte, die b-Werte und die Wasseraufnahmekapazitäten ermittelt worden. In der nachfolgenden **Tab. 9** sind die Ergebnisse aller Messungen mit dem Karstenschen Prüfröhrchen verzeichnet.

Tab. 9: *Messwerte der Messungen mit dem Karstenschen Prüfröhrchen an den Varietäten Unterpaol (UP), Oberpaol (OP) und Lappen (L)*

Probequader	**w-Wert** [kg/m^{2}h^{0,5}]	**b-Wert** [cm/h^{0,5}]	**WAK** [%]
UP_K1	1,7	0,8	13,1
UP_K2	1,0	0,8	11,7
UP_K3	1,7	1,0	16,8
UP_K4	1,7	1,3	13,4
OP_K1	1,5	0,76	19,8
OP_K2	1,4	1,0	14,2
OP_K3	1,56	1,0	15,6
OP_K4	1,45	0,9	15,0
L_K1	1,15	0,7	16,4
L_K2	1,2	0,75	14,4
L_K3	0,9	0,7	13,3
L_K4	1,0	1,0	10,3

An den Bohrkernen aus den Quadern wurde jeweils auch die Wasseraufnahme nach DIN bestimmt. Die Ergebnisse sind in

Tab. 10 dargestellt.

Tab. 10: *Messwerte der Messungen der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN an den Varietäten Unterpaol (UP), Oberpaol (OP) und Lappen (L)*

Bohrkern	**w-Wert** [kg/m²h^{0,5}]	**WAK** [%]
UP_2	2,4	15,5
UP_4	3,1	15,1
OP_2	2,1	15,3
OP_4	2,6	15,9
L_2	1,6	11,2
L_4	2,1	11,7

Zusätzlich zu der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN und mit dem Karstenschen Prüfröhrchen wurde für alle Varietäten auch die Flüssigkeitskapazität bzw. ml/h mit dem Mirowski-Röhrchen bestimmt. Hierbei erfolgte einerseits der Vergleich zwischen den drei Varietäten Lappen, Ober- und Unterpaol sowie die Gegenüberstellung der Aufnahme von deionisiertem Wasser und Testbenzin. Die nachfolgende Tabelle gibt die Dokumentation der Messungen wieder. Daraus ist ersichtlich, dass alle drei Varietäten mit dieser Methode nur eine sehr geringe Wasseraufnahme von 0,2 - 0,3 ml/h haben. Dem entgegen steht die Aufnahme von Testbenzin. Auch wenn die Probequader der verschiedenen Baumberger Varietäten nicht konserviert (hydrophobiert) sind und auch keine, durch Verwitterung verdichtete Oberfläche haben können, fiel die Aufnahme des unpolaren Testbenzins deutlich höher aus. Da es sich um unbehandeltes Material handelt, wird vermutet, dass die Flüssigkeit aus der freistehenden Schwammoberfläche am Steinkontakt verdunstet ist.

5.4.10.2 Ergebnisse zur Bestimmung der Rohdichte

Methode:

DIN 52 102 Nassgewicht: Ermittlung des Trockengewichts. Anschließend saugt sich die Probe kapillare voll und wird daraufhin 24 Stunden unter Wasser gelagert. Das Volumen der Proben wurde dann durch das Flüssigkeitsverdrängungsverfahren ermittelt. Aus dem Trockengewicht und dem Volumen wird dann die Rohdichte errechnet.

$$\rho = m/V \ [kg/m^3] \tag{5.4.10}$$

An Bohrkernstücken aller drei Varietäten ist die Rohdichte bestimmt worden (vgl. **Tab. 11**). Demnach verfügt die Varietät Lappen im Mittel über die höchste Rohdichte von 2,2 g/cm³, gefolgt von Unterpaol mit 2,08 g/cm³ und Oberpaol mit 2,04 g/cm³. Der Unterschied der Varietäten Unter- und Oberpaol ist jedoch so gering, dass die Varietäten als gleichwertig beschrieben werden können.

Tab. 11: *Daten der Rohdichteermittlung an den Varietäten Lappen, Ober- und Unterpaol und die jeweiligen Mittelwerte.*

Proben	**ρ in g/cm³**
UP1	2,07
UP2	2,02
UP3	2,09
UP4	2,13
∅ Unterpaol	**2,08**
OP_K1	1,5
OP_K2	1,4

Proben	ρ in g/cm³
OP_K3	1,56
OP_K4	1,45
∅ Oberpaol	**2,04**
L_K1	1,15
L_K2	1,2
L_K3	0,9
L_K4	1,0
∅ Lappen	**2,20**

Tab. 12: *Dokumentation der Mirowskimessung (Lappen, Unterpaol, Oberpaol) mit Wasser und Testbenzin.*

Messung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme mittels Mirowskiröhrchen

Objekt:	Baumberger Kalksandstein, Varietäten Lappen und Unterpaol
Bearbeiter:	Jeannine Meinhardt
Erläuterungen	
V_f	aufgenommenes Flüssigkeitsvolumen
d	Durchmesser des durchfeuchteten Bereichs; dient der Berechnung des als halbkugelförmig angenommenen durchfeuchteten Gesteinsvolumens V_a ($V_a = d^2 * 3,14 / 12$)
F_v	volumenbezogener Flüssigkeitsaufnahmegrad = Flüssigkeitskapazität ($F_v = V_f / V_a * 100$)

Nr. der Messung	1	2	3	4	5	6
Datum der Messung	02.07.2020	02.07.2020	02.07.2020	02.07.2020	02.07.2020	02.07.2020
Wetter / Klima	im Schatten 22°C	im Schatten 22°C	im Schatten 22°C	im Schatten 22°C	im Schatten 22°C	im Schatten 22°C
Art der Messflüssigkeit	H_2O_{dest}	Testbenzin	(blau) H_2O_{dest}	(rot) Testbenzin	(blau) H_2O_{dest}	(rot) Testbenzin
Vorreinigung Messstelle	abgespült, trocken	abgespült, trocken	abgespült, trocken	abgespült, trocken	abgespült, trocken	abgespült, trocken
Untergrundart	Varietät Lappen	Varietät Lappen	Varietät Unterpaol	Varietät Unterpaol	Varietät Oberpaol	Varietät Oberpaol
Untergrundzustand	unverwittert	unverwittert	unverwittert	unverwittert	unverwittert	unverwittert
Besonderheiten						
Fragestellung	Vergleich Wasser und Testbenzin	Vergleich Wasser und Testbenzin	Vergleich Wasser und Testbenzin	Vergleich Wasser und Testbenzin	Vergleich Wasser und Testbenzin	Vergleich Wasser und Testbenzin

Zeit	V_f	d	F_v	V_f	d	F_v	V_f	d	F_v	V_f	d	F_v	V_f	d	F_v	V_f	d	F_v
[min]	[ml]	[cm]	[%]	[ml]	[cm]	[%]	[ml]	[cm]	[%]	[ml]	[cm]	[%]	[ml]	[cm]	[%]	[ml]	[cm]	[%]
0	0,00			0,00			0,00			0,00			0,00			0,00		
5	0,10	1,5	11,3	0,20	1,6	18,7	0,00	2	0,0	0,30	2	14,3	0,00	1,5	0,0	0,20	1,8	13,1
10	0,10	1,5	11,3	0,35	1,8	22,9	0,05	2,1	2,1	0,60	2,1	24,8	0,05	1,5	5,7	0,50	1,9	27,9
15	0,10	1,5	11,3	0,50	1,9	27,9	0,10	2,2	3,6	0,80	2,2	28,7	0,10	1,6	9,3	0,90	2	43,0
20	0,10	1,5	11,3	0,65	2	31,1	0,10	2,3	3,1	1,00	2,2	35,9	0,10	1,6	9,3	1,20	2	57,3
25	0,10	1,5	11,3	0,85	2,1	35,1	0,10	2,4	2,8	1,20	2,3	37,7	0,10	1,6	9,3	1,50	2,1	61,9
30	0,15	1,6	14,0	1,05	2,1	43,3	0,15	2,5	3,7	1,55	2,3	48,7	0,10	1,7	7,8	1,80	2,1	74,3
35	0,20	1,6	18,7	1,10	2,1	45,4	0,15	2,6	3,3	1,70	2,4	47,0	0,10	1,7	7,8	1,90	2,1	78,4
40	0,20	1,6	18,7	1,30	2,2	46,7	0,15	2,7	2,9	2,00	2,4	55,3	0,10	1,7	7,8	2,20	2,2	79,0
45	0,25	1,6	23,3	1,40	2,2	50,2	0,15	2,8	2,6	2,20	2,5	53,8	0,15	1,8	9,8	2,50	2,2	89,7
ml / h	**0,3**			**1,9**			**0,2**			**2,9**			**0,2**			**3,3**		

5.4.10.3 Ergebnisse zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

In **Tab. 13** sind die Ergebnisse der insgesamt 12 Messungen des Wasserdampfdiffusionswiderstandes an den drei Baumberger Kalksandsteinvarietäten verzeichnet. Ermittelt wurden die µ-Werte an Bohrkernscheiben der einzelnen Varietäten des Baumberger Kalksandsteins Oberpaol, Unterpaol und Lappen. Berücksichtigt wurde dabei die Ausrichtung des Bohrkerns bezüglich der Schichtung des Gesteins (parallel bzw. senkrecht). In **Diagr. 4** ist der Verlauf der Messung über 19 Tage dokumentiert.

Tab. 13: *Überblick über die Messwerte (Wägung) im Rahmen der Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes (dunklerer Farbton einer Farbe Proben parallel zur Schichtung, hellerer Farbton - senkrecht) (OP - Oberpaol, UP -Unterpaol, L - Lappen)*

Datum	27.02.2020	28.02.2020	02.03.2020	06.03.2020	09.03.2020	14.03.2020	17.03.2020
Bezeichnung	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
UP 3	193,07	192,8	191,99	190,90	189,99	188,54	187,75
UP 5	200,49	200,27	199,55	198,59	197,78	196,49	195,79
UP 3	202,59	202,26	201,29	199,99	198,87	197,07	196,09
UP 4	201,15	200,8	199,75	198,31	197,12	195,19	194,19
OP 3	191,26	190,98	189,84	188,33	187,09	185,12	184,01
OP 5	213,74	213,43	212,44	211,15	210,03	208,34	207,43
OP 3	209,89	209,49	208,39	206,91	205,6	203,59	202,5
OP 5	225,6	225,24	224,17	222,68	221,46	219,57	218,51
L 3	207,85	207,55	206,56	205,28	204,23	202,52	201,58
L 4	194,89	194,64	193,78	192,64	191,68	190,15	189,35
L 1	200,03	199,66	198,49	196,97	195,66	193,61	192,49
L 3	201,35	200,97	199,79	198,27	197,08	195,14	194,1

Diagr. 4: *Messkurven der 12 untersuchten Bohrkernscheiben im Verlauf der insgesamt 19 Untersuchungstage (27.02.2020-17.03.2020)*

Jeder Bohrkern ist mit zwei Einzelmessungen repräsentiert, die im **Diagr. 5** direkt nebeneinanderstehen. Generell gilt, je höher der µ-Wert, umso höher ist der Wasserdampfdiffusionswiderstand des Materials. Aus dem Diagramm (siehe **Diagr. 5**) wird zum einen deutlich, dass die Varietät Unterpaol (UP) sowohl in paralleler als auch in senkrechter Ausrichtung die höchsten µ-Werte aufweist. Bei den parallel ausgerichteten Kernen folgt dann die Varietät Lappen, gefolgt von Oberpaol. Bei den senkrecht ausgerichteten Kernen liegen Lappen und Oberpaol nahezu

gleichauf. Weiterhin ist dem Diagramm zu entnehmen, dass die beiden Einzelmessungen an einem Bohrkern je nach Varietät unterschiedlich starke Abweichungen aufweisen. Die stärkste Abweichung zeigt dabei die Varietät Lappen, in paralleler Ausrichtung zur Schichtung, was Ausdruck für eine stärkere Heterogenität des Materials sein könnte. Die Mittelwerte (Unterpaol ⊥ 22,6 ∥ 26,9; Oberpaol ⊥ 20 ∥ 22; Lappen ⊥ 20 ∥ 23,9) zeigen, wie auch die Balken in **Diagr. 5**, dass die µ-Werte für die jeweilige Varietät parallel zur Schichtung stets höher liegen als die Werte senkrecht zur Schichtung. Weiterhin wird deutlich, dass die Varietät Unterpaol die höchsten Wasserdampfdiffusionswiderstände aufweist, wohingegen Oberpaol und Lappen nahezu gleichauf sind.

Diagr. 5: *Darstellung der µ-Werte der Einzelmessungen an Bohrkernscheiben der einzelnen Varietäten des Baumberger Kalksandsteins (Oberpaol = OP, Unterpaol = UP, Lappen = L). Berücksichtigt wurde dabei auch die Ausrichtung des Bohrkerns bezüglich der Schichtung des Gesteins (parallel oder senkrecht). Jeder Bohrkern ist mit zwei Einzelmessungen repräsentiert, die im Diagramm direkt nebeneinanderstehen. (Mittelwerte: Unterpaol ⊥ 22,6 ∥ 26,9; Oberpaol ⊥ 20 ∥ 22; Lappen ⊥ 20 ∥ 23,9).*

5.4.10.4 Ergebnisse biaxiale Biegezugfestigkeit und E-Modul

An insgesamt 18 Proben sind die biaxiale Biegezugfestigkeit und der statische E-Modul erfasst worden. Die Proben verteilen sich folgendermaßen über die drei untersuchten Varietäten. Von jeder Varietät liegen drei Einzelmessungen sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung vor (pro Quader 6 Messungen). In **Tab. 14** sind die Ergebnisse der Messungen verzeichnet. Die Proben, deren Ausrichtung parallel zur Schichtung ist, sind hier grün markiert, die mit senkrechter Ausrichtung gelb.
Aus den jeweils drei Einzelmessungen wurde ein Mittelwert errechnet, der stellvertretend für jede Gesteinsvarietät und die beiden Probenausrichtungen Eingang in **Diagr. 6** gefunden hat.
Aus dem **Diagr. 6** ist zum einen keine einheitliche Tendenz bei den drei Gesteinsvarietäten bezüglich der Unterschiede zwischen der Ausrichtung parallel und senkrecht der Schichtung ablesbar. Für das Material Oberpaol sind sowohl die Biegezugfestigkeit als auch der E- Modul bei senkrechter Ausrichtung leicht höher als parallel. Dem entgegen stehen die Verhältnisse bei der Varietät Lappen. Das Material Unterpaol zeigt nahezu keine Abhängigkeit der Kennwerte von der Ausrichtung der Proben.

Diagr. 6: *Gegenüberstellung der Kennwerte der biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls unter Berücksichtigung der verschiedenen Varietäten und auf der möglichen Ausrichtung der Proben parallel (grün) und senkrecht (gelb) zur Schichtung.*

Tab. 14: *Biaxiale Biegezugfestigkeiten und statische E-Moduli der untersuchten Bohrkernscheiben (Messungen am 10.03.2020) (grün markierte Proben parallel zur Schichtung, gelb – senkrecht.*

Bez.Probe	d/mm	r/mm	h/mm	σ [N/mm²]	E [kN/mm²]
OP2-1	48,77	24,39	4,75	5,60	2,15
OP2-2	48,80	24,40	4,77	4,47	1,49
OP2-4	48,78	24,39	4,81	6,86	2,07
Mittelwert				**5,6 N/mm²**	**1,9 kN/mm²**
OP4-1	48,86	24,43	4,92	6,75	3,47
OP4-2	48,80	24,40	4,80	5,92	2,34
OP4-4	48,80	24,40	4,88	6,72	2,90
Mittelwert				**6,46 N/mm²**	**2,9 kN/mm²**
UP2-1	48,78	24,39	4,81	7,61	3,64
UP2-2	48,78	24,39	5,21	7,54	3,27
UP2-4	48,76	24,38	4,76	9,26	4,44
Mittelwert				**8,13 N/mm²**	**3,78 kN/mm²**
UP4-1	48,78	24,39	4,76	7,42	3,84
UP4-2	48,86	24,43	4,87	8,10	4,07
UP4-5	48,78	24,39	4,78	7,76	3,75
Mittelwert				**7,76 N/mm²**	**3,89 kN/mm²**
L2-1	48,82	24,41	5,04	6,82	2,26
L2-2	48,77	24,39	4,94	7,94	2,58
L2-5	48,77	24,39	4,80	5,30	2,11
Mittelwert				**6,69 N/mm²**	**1,9 kN/mm²**
L4-2	48,75	24,28	4,89	5,63	1,33
L4-4	48,82	24,41	4,84	5,46	1,20
L4-5	48,73	24,37	4,78	4,06	1,60
Mittelwert				**5,05 N/mm²**	**1,38 kN/mm²**

5.4.10.5 Ergebnisse Ultraschallmessungen

Die Ultraschallgeschwindigkeit wird genutzt als Maß für den relativen Zustand eines mineralischen Baustoffs bzw. dessen Festigkeit. Im Rahmen des Projekts sollten für die drei Varietäten repräsentative Ultraschallgeschwindigkeiten des unverwitterten Materials ermittelt werden. Wie in Kapitel 5.4.9 beschrieben, sind in dem Zusammenhang insgesamt 6 Bohrkerne untersucht worden, zwei von jeder Varietät, einer in Ausrichtung parallel und einer senkrecht zur Schichtung. Pro Bohrkern wurden 8 Einzelmessungen ausgeführt, die wie in **Diagr. 6** gezeigt angeordnet waren. Die dort angegebenen Punkte zeigen immer nur den Ansatzpunkt des Impulsgebers. Dem genau gegenüber war jeweils der Empfänger positioniert.

In **Tab. 15** sind die Ergebnisse der Einzelmessungen dargestellt. Aus vier zusammengehörigen Messungen wurde jeweils ein Mittelwert gebildet, der in der Gegenüberstellung der Varietäten in **Diagr. 7** Berücksichtigung findet.

Tab. 15: *Übersicht der ermittelten Ultraschallwerte (Messung am 08.03.2020) (grün markierte Proben parallel zur Schichtung, gelb - senkrecht)*

Bez. Probe	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	Mittelwert
OP1_MP parallel	3,1 km/s	3,4 km/s	3,7 km/s	3,8 km/s	**3,5 km/s**
OP1_MP parallel	3,1 km/s	3,5 km/s	3,6 km/s	3,8 km/s	**3,5 km/s**
OP3_MP senkrecht	3,0 km/s	3,0 km/s	3,0 km/s	2,9 km/s	**3,0 km/s**
OP3_MP parallel	3,5 km/s	3,5 km/s	3,6 km/s	3,5 km/s	**3,5 km/s**
UP1_MP parallel	3,8 km/s	4,0 km/s	4,0 km/s	4,1 km/s	**4,0 km/s**
UP1_MP parallel	3,6 km/s	4,1 km/s	4,1 km/s	4,0 km/s	**4,1 km/s**
UP3_MP senkrecht	3,8 km/s	3,7 km/s	3,8 km/s	3,8 km/s	**3,8 km/s**
UP3_MP parallel	4,2 km/s	4,2 km/s	4,2 km/s	4,2 km/s	**4,2 km/s**
L1_MP parallel	3,7 km/s	3,5 km/s	3,8 km/s	3,8 km/s	**3,7 km/s**
L1_MP parallel	3,7 km/s	3,4 km/s	3,8 km/s	3,8 km/s	**3,7 km/s**
L3_MP senkrecht	3,4 km/s	3,5 km/s	3,4 km/s	3,4 km/s	**3,4 km/s**
L3_MP parallel	3,8 km/s	4,1 km/s	4,1 km/s	4,0 km/s	**4,0 km/s**

In der graphischen Gegenüberstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten der Kalksandsteinvarietäten (siehe **Diagr. 7**) stehen immer zwei Balken beieinander. Sie repräsentieren für jeden untersuchten Bohrkern die Messungen, die daran einmal in Position „12:00 Uhr" (in Anlehnung an die Anordnung der Zahlen auf der Uhr) und „3:00 Uhr" ausgeführt worden sind (siehe
Abb. 27). Ist der Bohrkern parallel zur Schichtung ausgerichtet, repräsentieren beide Messrichtungen die Gegebenheiten parallel zur Schichtung. Daher sind diese Balken grün gefärbt. Ist der Bohrkern jedoch im Bereich der Lagerung senkrecht zur Schichtung entnommen, gibt die Richtung „12:00 Uhr" die Verhältnisse senkrecht zur Schichtung wieder (gelb) und „3:00 Uhr" parallel (grün).
Erwartungsgemäß sind bei den Bohrkernen, die parallel zur Schichtung gezogen worden sind (OP1, UP1 und L1) die Mittelwerte der beiden Messrichtungen sehr ähnlich, da beide parallel zur Schichtung angeordnet sind. Aus der Gegenüberstellung, sowohl der jeweils parallel als auch senkrecht zur Schichtung ausgerichteten Bohrkerne wird deutlich, dass die Varietät Unterpaol die höchsten Ultraschallgeschwindigkeiten hat. An zweiter Stelle steht die Varietät Lappen, gefolgt von Oberpaol. Da die Ultraschallgeschwindigkeit positiv mit der Dichte bzw. der Festigkeit des Materials zu korrelieren ist, kann rückgeschlossen werden, dass Unterpaol die größten Festigkeiten bzw. Dichte aufweist. Dieses Resultat stimmt mit den Ergebnissen der Messungen der biaxialen Biegezugfestigkeit/E-Modul überein. Die Kennwerte der Ultraschallmessung der Bohrkerne, die senkrecht zur Schichtung entnommen wurden, weisen in beide Messrichtungen deutlich abweichende Ergebnisse auf.

Erstaunlich ist allerdings, dass die Messwerte wider Erwarten senkrecht zur Schichtung niedriger sind als die parallel (siehe **Diagr. 7**). Die größte Differenz ist bei der Varietät Lappen festzustellen.

Diagr. 7: *Darstellung der Mittelwerte der Ultraschallmessungen an den verschiedenen Varietäten Oberpaol (OP), Unterpaol (UP) und Lappen (L) unter Angabe der Ausrichtung der Bohrkerne bezogen auf die Schichtung des Gesteins (parallel = par und senkrecht = senk). Zwei zusammenstehende Balken repräsentieren die Messungen an einem Bohrkern, die in zwei Richtungen ausgeführt wurden.*

5.4.11 Petro-Physikalische Eigenschaften

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Die folgenden Versuche wurden an bruchfrischem Material der Steinbrüche Fark und Dirks (Unterpaol, Oberpaol, Lappen) sowie vergleichend an Kernmaterial[8] ausgebauter, historischer Werksteine durchgeführt.

5.4.12 Versuchsdurchführungen

Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeiten erfolgte gemäß DIN 1926:2007-03 an würfelförmigen Prüfkörpern mit einer Kantenlänge 70 (±5) mm. Die Proben wurden nass gesägt und geschliffen und vor der Prüfung bei 70°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Ermittelt wurden die Druckfestigkeiten senkrecht und parallel zur geologischen Schichtung an jeweils 6 Prüfkörpern.

Rohdichte (RD), Freie kapillare Wasseraufnahme (WA), Offene Porosität (OP)

Für die Bestimmung dieser Kennwerte wurden die Natursteinwürfel genutzt, an denen später die Druckfestigkeiten ermittelt wurden (s.o.). Zur Bestimmung der Rohdichte wurde das Volumen entsprechend dem Prüfverfahren in der Norm DIN EN 772-3:1998-10 mittels hydrostatischer Wägung (Unterwasserwägung) ermittelt. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte unter Berücksichtigung der Norm DIN EN 772-21:2011-07 (24 h Unterwasserlagerung). Die offene Porosität wurde aus den Ergebnissen der Wasseraufnahme und dem bei der Unterwasserwägung ermittelten Volumen errechnet.

[8] Von den ausgebauten Quadern wurden an allen Seiten mindestens 5 cm abgesägt, um Kernmaterial zu erhalten, dass möglichst wenig von der Witterung beeinflusst wurde und damit in etwa den Ausgangszustand repräsentiert.

Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)
Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte entsprechend der Norm DIN 52617. Die flächenbezogene Wasseraufnahme wird bei Benetzen einer Probenoberfläche (Saugfläche) aus der zeitabhängigen Massezunahme und der Größe der Saugfläche ermittelt. Hierfür wurden würfelförmige Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 70 (±5) mm an 4 Seiten mit Paraffin ummantelt. Gemessen wurden jeweils 6 Prüfkörper der einzelnen Varietäten.

Trocknungsverhalten (im eindimensionalen Feuchtestrom)
Hierfür wurden die w-Wert-Prüfkörper genutzt (6 Stück pro Varietät, s.o.). Nachdem diese Würfel durch das kapillare Saugen vollständig durchfeuchtet waren, wurde eine weitere Seite abgedichtet. Die Trocknung erfolgte eindimensional über die offene Fläche. Die Versuche wurden bei Normalklima 20 °C / 65% r. F. durchgeführt. Die Gewichtsabnahme wurde in regelmäßigen Abständen ermittelt und dokumentiert.

Sorptionsfeuchte
Die Bestimmung der sorptiven Wasseraufnahme erfolgte an würfelförmigen Prüfkörpern (Kantenlänge 30 mm) bei drei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten (30%, 65%, 90% r. F.), die in geschlossenen Exsikkatoren mit unterschiedlichen Salzlösung eingestellt wurden. Die Prüfkörper waren auf einem Sieb oberhalb der Salzlösungen angeordnet. Vor dem Versuch wurden die Prüfkörper 3 Tage bei 40°C getrocknet. Begonnen wurde mit der niedrigsten Luftfeuchtigkeit. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz erfolgte die Umlagerung in die nächsthöhere Feuchtigkeit.

Wasserdampfdiffusion (µ-Wert, sd-Wert)
Der Wasserdampfdiffusionswiderstand wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 12572: 2017-05 im so genannten wet cup-Verfahren ermittelt. Scheibenförmige Prüfkörper mit einem Durchmesser von etwa 80 mm und einer Dicke von etwa 20 mm wurden über einem wassergefüllten Prüfgefäß so befestigt (randlich abgedichtet), dass eine Feuchteabgabe nur über die definierte Oberfläche erfolgten konnte. Die Prüfung erfolgte unter konstanten Bedingungen.

Umgebungsluft (Klimaraum):	20 °C, 65% r. F.
Bedingungen im Gefäß:	20 °C, 99% r. F.

5.4.12.1 Druckfestigkeit

Für die einzelnen Varietäten (Oberpaol, Unterpaol und Lappen) wurden jeweils 6 Messungen senkrecht und parallel zur geologischen Schichtung an Prüfkörpern 7x7x7 cm durchgeführt. Die Mittelwerte der Druckfestigkeit des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins liegen zwischen 40 und 43 N/mm2. Unter Berücksichtigung der ermittelten Standardabweichungen sind keine deutlichen Unterschiede zwischen den Varietäten erkennbar. Ein signifikanter Einfluss der Schichtung auf die Druckfestigkeit ist ebenfalls nicht ersichtlich. Allerdings ist die Streubreite der Messwerte parallel zur Schichtung größer (höhere Standardabweichungen).

Tab. 16: *Druckfestigkeiten unter Berücksichtigung der Schichtung aller Varietäten.*

Varietät	Druckrichtung	Proben-Nr.	Rohdichte (Bruttotrocken-rohdichte	Druckfestigkeit	Mittelwert (±Stabw.)
			[g/cm³]	[N/mm²]	[N/mm²]
Oberpaol	senkrecht zur Schichtung	OP 1.13-1	1,99	44,45	43,8 (±1,9)
		OP 1.13-2	1,97	43,23	
		OP 1.14-1	1,99	42,65	
		OP 1.14-2	2,02	45,67	
		OP 2.8-1	2,04	41,08	
		OP 2.8-2	2,02	45,86	
	parallel zur Schichtung	OP 1.13-1	1,99	36,29	41,8 (±4,0)
		OP 1.13-2	2,01	42,81	
		OP 1.14-1	1,99	40,23	
		OP 1.14-2	1,97	39,33	
		OP 2.8-1	2,03	44,88	
		OP 2.8-2	2,05	47,22	
Unterpaol	senkrecht zur Schichtung	UP 4.2-1	1,93	37,64	41,1 (±2,1)
		UP 4.2-2	1,94	39,44	
		UP 4.3-1	1,98	43,10	
		UP 4.3-2	1,98	42,04	
		UP 4.10-1	1,99	41,50	
		UP 4.10-2	2,08	42,62	
	parallel zur Schichtung	UP 4.2-3	1,94	34,81	41,3 (±6,8)
		UP 4.2-4	1,98	41,66	
		UP 4.3-3	1,96	36,38	
		UP 4.3-4	1,96	42,43	
		UP 4.10-3	2,05	53,86	
		UP 4.10-4	2,07	38,63	
Lappen	senkrecht zur Schichtung	L 1.6-1	2,08	45,37	43,2 (±1,8)
		L 1.6-2	2,07	41,98	
		L 1.7-1	2,12	44,14	
		L 1.7-2	2,09	43,96	
		L 1.11-1	2,07	40,20	
		L 1.11-2	2,12	43,34	
	parallel zur Schichtung	L 1.6-3	2,07	40,70	40,1 (±3,5)
		L 1.6-4	2,08	37,60	
		L 1.7-3	2,12	40,38	
		L 1.7-4	2,09	38,99	
		L 1.11-3	2,07	36,44	
		L 1.11-4	2,12	46,51	

5.4.12.2 Rohdichte, Wasseraufnahme, Porosität

Die Werte wurden durch so genannte Tauchwägung ermittelt. Die Rohdichten liegen knapp über 2 g/cm^3, am Material „Lappen" ist die RD mit 2,12 g/cm^3 etwas höher an den beiden Paol-Varietäten (jeweils 2,03) g/cm^3. Entsprechend ist die Wasseraufnahme des „Lappen" etwas niedriger (7 M-%) gegenüber dem „Paol" (9 M-%). Die „offene Porosität" (d. h. der kapillar zugängliche Porenraum) beträgt 18 bzw. 20 Vol-% für „Paol" und 16 M-% für „Lappen".

***Tab. 17**: Rohdichte, freie kapillare Wasseraufnahme und offene Porosität*

Varietät	**Proben-Nr.**	**Rohdichte** [g/cm^3]		**Freie kapillare Wasseraufnahme** [M%]		**Offene Porosität** [Vol.-%]	
		EW	**MW** (±Stabw)	EW	**MW** (±Stabw)	EW	**MW** (±Stabw)
Oberpaol	OP 1.13-3	2,01	**2,03** (±0,03)	8,79	**8,6** (±0,4)	17,67	**17,7** (±0,6)
	OP 1.13-4	2,03		8,61		17,50	
	OP 1.14-3	2,01		8,93		17,94	
	OP 1.14-4	2,01		8,95		18,00	
	OP 2.8-3	2,06		8,06		16,64	
	OP 2.8-4	2,07		8,07		16,67	
Unterpaol	UP 4.2-3	1,96	**2,03** (±0,05)	10,11	**9,1** (±0,8)	19,83	**19,8** (±1,2)
	UP 4.2-4	2,04		8,68		17,74	
	UP 4.3-3	2,00		9,63		19,22	
	UP 4.3-4	2,00		9,62		19,28	
	UP 4.10-3	2,07		8,33		17,23	
	UP 4.10-4	2,11		7,99		16,82	
Lappen	L 1.6-3	2,09	**2,12** (±0,02)	7,78	**7,4** (±0,4)	16,29	**16,3** (±0,7)
	L 1.6-4	2,10		7,77		16,29	
	L 1.7-3	2,14		6,88		14,71	
	L 1.7-4	2,13		7,19		15,28	
	L 1.11-3	2,11		7,57		15,93	
	L 1.11-4	2,15		6,96		14,99	

5.4.12.3 Wasseraufnahmekoeffizient

Das Saugverhalten kann anhand der w-Werte als „deutlich saugend" eingestuft werden. Die flächenbezogene, kapillare Wasseraufnahme ist bei den Varietäten „Oberpaol" und „Lappen" etwa gleich (2 kg/m^{2}h^{0,5}), der „Unterpaol" saugt etwa doppelt so stark (ca. 4 kg/m^{2}h^{0,5}).
Bei keiner der Varietäten ist eine Abhängigkeit des w-Wertes von der Schichtung erkennbar.

***Tab. 18:** Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Werte)*

Varietät	Proben-Nr.	**w-Wert** kg/(m²h^0,5)			
		parallel zur Schichtung		**senkrecht zur Schichtung**	
		Einzelwerte	**Mittelwerte** (±Stabw)	**Einzelwerte**	**Mittelwerte** (±Stabw)
Oberpaol	OP 1.13-5	2,1	**2,2** (±0,1)	1,6	**1,8** (±0,2)
	OP 1.13-6	2,1		1,5	
	OP 1.14-5	2,3		1,6	
	OP 1.14-6	2,2		2,1	
	OP 2.8-5	2,3		2,1	
	OP 2.8-6	2,3		1,7	
Unterpaol	UP 4.2-5	3,4	**3,8** (±0,3)	3,1	**3,5** (±0,9)
	UP 4.2-6	3,5		2,3	
	UP 4.3-5	4,3		2,7	
	UP 4.3-6	4,0		4,1	
	UP 4.10-5	3,8		3,7	
	~~UP 4.10-6~~	~~(6,5)~~		5,2	
Lappen	L 1.6-5	2,0	**1,9** (±0,3)	1,6	**1,7** (±0,3)
	L 1.6-6	2,0		2,3	
	L 1.7-5	2,0		1,7	
	L 1.7-6	1,6		1,6	
	L 1.11-5	2,4		1,4	
	L 1.11-6	1,6		1,5	

Diagr. 8: *Porengrößenverteilung (Porendurchmesser) der Varietät Oberpaol.*

Diagr. 9: *Flächenbezogene Wasseraufnahme des Oberpaol senkrecht zur Schichtung.*

Diagr. 10: *Flächenbezogene Wasseraufnahme des Unterpaol parallel zur Schichtung.*

Diagr. 11: *Flächenbezogene Wasseraufnahme des Unterpaol senkrecht zur Schichtung.*

Diagr. 12: *Flächenbezogene Wasseraufnahme des Lappen parallel zur Schichtung.*

Diagr. 13: *Flächenbezogene Wasseraufnahme des Lappen senkrecht zur Schichtung.*

5.4.12.4 Vergleich Steinbruchproben mit Kernmaterial historischer Werksteinquader

Abb. 28: *Ausgebaute BKS-Quader vom Haus Stapel.*

Tab. 19: *Materialkennwerte der Quader vom Haus Stapel.*

Probenbezeichnung		Rohdichte [g/cm³]	Freie kapillare Wasseraufnahme [M%]	Offene Porosität [V%]	Druckfestigkeit [N/mm²]
BW1	**A**	2,31	4,1	9,4	77,0
	B	2,20	5,4	11,9	93,6
BW2	**A**	2,31	4,4	10,2	120,6
	B				134,6
BW3	**A**	2,21	5,8	12,7	95,3
	B	2,21	5,3	11,8	79,9

Tab. 20: *Materialkennwerte der Steinbruchproben.*

Probenbezeichnung	Rohdichte [g/cm³]	Freie kapillare Wasseraufnahme [M%]	Offene Porosität [V%]	Druckfestigkeit[9] [N/mm²]
Oberpaol	2,03 (±0,03)	8,6 (±0,4)	17,7 (±0,6)	43,8 (±1,9)
Unterpaol	2,03 (±0,05)	9,1 (±0,8)	19,8 (±1,2)	41,1 (±2,1)
Lappen	2,12 (±0,02)	7,4 (±0,4)	16,3 (±0,7)	43,2 (±1,8)

Bewertung:
Durch die Untersuchungen an den BKS-Quadern, die durch die Fa. Wennemer aus dem Mauerwerk des Hauses Stapel ausgebaut wurden (BW 1 bis 3), kann ein Vergleich der grundlegenden Materialkennwerte zwischen dem im DBU-Projekt untersuchten bruchfrischen BKS (Varietäten Oberpoal, Unterpoal und Lappen) und einem „historischen" BKS-Werkstein erfolgen.
Von den ausgebauten Quadern wurden an allen Seiten mindestens 5 cm abgesägt, um Kernmaterial zu erhalten, dass möglichst wenig von der Witterung beeinflusst wurde und damit in etwa den Ausgangszustand repräsentiert. Die an den Objekt-Quadern ermittelten Kennwerte sind in **Tab. 19** dargestellt, die Werte der Steinbruchproben enthält **Tab. 20**.
Es ist ersichtlich, dass die Bauwerksquader wesentlich dichter und fester sind. Die Rohdichten liegen zwischen 2,1 und 2,3 g/cm³ (Haus Stapel) gegenüber 2,0 bis 2,1 g/cm³ (bruchfrischer BKS). Auch die Porosität und die Wasseraufnahme unterscheiden sich signifikant (Porosität: 9-13 gegenüber 16-20 Vol-%; Wasseraufnahme: 4-6 gegenüber 7-9 M-%). Beachtlich sind auch die Unterschiede in den Druckfestigkeiten. Die Objektproben liegen mit 80-130 N/mm² etwa 200% über dem bruchfrischen Material (um 40 N/mm²).

5.4.12.5 Trocknungsverhalten (im eindimensionalen Feuchtestrom)

Gemessen wurde zunächst die eindimensionale Trocknung von vollständig wassergesättigten BKS-Würfeln über 55 Tage, wobei die Gewichtsänderung in 6 Tage – Schritten erfasst wurde (**Diagr. 15**). Bei den Varietäten Unterpaol und Lappen zeigen sowohl alle 6 Prüfkörper untereinander als auch die beiden Steinvarianten ein einheitliches und annähernd gleiches Trocknungsverhalten. Zum ersten Messpunkt - nach 6 Tagen – hatten die Steine bereits 60-70% des ursprünglich enthaltenen Wassers abgegeben. Die

[9] Druckfestigkeiten senkrecht zur Schichtung

Varietät Oberpaol zeigt ein uneinheitliches Verhalten innerhalb der Prüfkörper. Nach dem gleichen Trocknungszeitraum (6 Tage) lag die abgegebene Wassermenge zwischen etwa 30 und 80%.
Um die Trocknung innerhalb der ersten Tage beurteilen zu können, wurden die Versuche an den gleichen Prüfkörpern mit kürzeren (täglichen) Messintervallen wiederholt (**Diagr. 14**). Die oben beschriebenen Unterschiede am Oberpaol trat hierbei nicht auf. Alle Varietäten zeigen in den ersten 4 Tagen ein identisches, nahezu gleichmäßiges Trocknungsverhalten. Pro Tag werden etwa 25% der enthaltenen Wassermenge abgegeben.

Diagr. 14: *Vergleich der prozentualen 4-Tage-Wasserabgabe der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen (jeweils 3 Proben, Messwerte in Tagesschritten).*

Diagr. 15: *Vergleich der prozentualen 55-Tage-Wasserabgabe der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen (jeweils 3 Proben, Messwerte in Tagesschritten)*

5.4.12.6 Sorptionsfeuchte

Es wurden so genannte 3-Punkt-Messungen durchgeführt, d.h. die Gleichgewichtsfeuchte wurde für drei verschiedene Luftfeuchten (30%, 65% und 90% r. F.) durch Lagerung über Salzlösungen bestimmt. Nur im unteren Luftfeuchtebereich (30%) sind Unterschiede zwischen den Varietäten feststellbar. Während „Paol" etwa 0.1 M-% erreicht, beträgt die Sorptionsfeuchte des „Lappen" etwa 0,2 M-%. Bei den weiteren Messpunkten sind keine Unterschiede zwischen den Varietäten feststellbar (0,4 M-% bei 65% und 0,9 M-% bei 90% r. F.).

Tab. 21: *Sorptive Wasseraufnahme bei 30, 65 und 90% relativer Luftfeuchte und 20°C.*

Varietät	**Proben-Nr.**	**Wasseraufnahme [M-%]**					
		20°C / **30%** r.F.		20°C / **65%** r.F.		20°C / **90%** r.F.	
		EW	**MW** (±Stabw)	EW	**MW** (±Stabw)	EW	**MW** (±Stabw)
Oberpaol	OP 1.13-7	0,09	**0,11** (±0,03)	0,43	**0,39** (±0,06)	1,02	**0,91** (±0,14)
	OP 1.13-8	0,13		0,38		0,87	
	OP 1.14-7	0,11		0,39		0,90	
	OP 1.14-8	0,16		0,47		1,12	
	OP 2.8-7	0,09		0,32		0,77	
	OP 2.8-8	0,10		0,33		0,78	
Unterpaol	UP 4.2-7	0,11	**0,09** (±0,02)	0,32	**0,32** (±0,05)	0,72	**0,78** (±0,15)
	UP 4.2-8	0,09		0,32		0,79	
	UP 4.3-7	0,09		0,37		0,96	
	UP 4.3-8	0,10		0,38		0,94	
	UP 4.10-7	0,07		0,24		0,61	
	UP 4.10-8	0,09		0,28		0,65	
Lappen	L 1.6-7	0,25	**0,18** (±0,03)	0,49	**0,45** (±0,04)	0,98	**0,95** (±0,07)
	L 1.6-8	0,25		0,42		0,92	
	L 1.7-7	0,18		0,39		0,85	
	L 1.7-8	0,17		0,43		0,89	
	L 1.11-7	0,18		0,48		1,02	
	L 1.11-8	0,18		0,49		1,02	

5.4.12.7 Wasserdampfdiffusion

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand aller Varietäten zeigt sich etwa gleich niedrig (µ-Wert: 8 - 9; sd-Wert: 0,1 – 0,2).

Tab. 22: *Wasserdampfdiffusionswiderstand (µ-Werte und sd-Werte)*

Varietät	Proben-Nr.	Wasserdampfdiffusionswiderstand			
		µ-Wert		sd-Wert	
		EW	**MW** (±Stabw)	EW	**MW** (±Stabw)
Oberpaol	OP1.13-9	8,3	**8,6** (±0,7)	0,2	**0,2** (±0,1)
	OP1.13-10	8,1		0,1	
	OP1.14-9	8,2		0,1	
	OP1.14-10	8,1		0,1	
	OP2.8-9	8,9		0,2	
	OP2.8-10	9,8		0,2	
Unterpaol	UP4.2-9	8,1	**8,1** (±0,5)	0,2	**0,2** (±0,1)
	UP4.2-10	8,6		0,2	
	UP4.3-9	7,7		0,1	
	UP4.3-10	7,4		0,1	
	UP4.10-9	8,3		0,1	
	UP4.10-10	8,7		0,2	
Lappen	L1.6-9	9, 9	**8,9** (±0,9)	0,1	**0,1** (±0,0)
	L1.6-10	9,5		0,1	
	L1.7-9	10,0		0,1	
	L1.7-10	8,7		0,2	
	L1.11-9	8,3		0,1	
	L1.11-10	7,8		0,1	

5.5 Dilatationsverhalten

5.5.1 Hydrische Dilatation

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Die Messung der hydrischen Dilatation wurde am Deutschen Bergbau-Museum Bochum (DBM Bochum)[10] durchgeführt. Hierzu wurden von den drei Varietäten Lappen, Unterpaol und Oberpaol jeweils Prismen mit den Kantenlängen 12 x 12 x 44 mm senkrecht und parallel zur Schichtung gefertigt. Die Messungen wurden pro Varietät und Richtung an jeweils 12 Vergleichsproben durchgeführt.
Die Prüfkörper wurden zur Messung in ein Gefäß eingestellt und jeweils an einen Wegaufnehmer angeschlossen. Das Gefäß wurde mit deionisiertem Wasser bis zur vollständigen Wasserbedeckung der Probe befüllt und die Längenänderung über die Dauer von 120 Minuten gemessen[11].
Die Anisotropie wurde anhand der Differenz der beiden Längenänderungen in beide Richtungen (senkrecht und parallel zur Schichtung) festgestellt.

[10] Bericht 2020_31 MG: Sebastian Pewny, Dirk Kirchner, Georg Wange
[11] Frdl. Mitteilung der Autoren

5.5.1.1 Untersuchungsergebnisse

Die Messergebnisse der hydrischen Dehnung bei der Varietät „Lappen" zeigen starke Schwankungen. Man kann hier eine Dehnung senkrecht zur Schichtung von 1,45 +/- 0,3 mm/m erkennen. Parallel zur Schichtung liegen die Werte erwartungsgemäß niedriger bei 0,44 +/- 0,15 mm/m. Die Anisotropie hat den Faktor 2,32. Die Werte der hydrischen Dehnung der Varietät Unterpaol liegen senkrecht zur Schichtung bei 0,52 mm/m mit einer Streuung von 0,3 bis 0,5 mm/m und parallel zur Schichtung bei 0,24 +/- 0,13 mm/m. Die Anisotropie der Varietät Unterpaol hat den Faktor 1,13. Die parallel zur Schichtung gemessenen Werte der Varietät Oberpaol liegen bei 0,15 +/- 0,05 mm/m und senkrecht zur Schichtung bei 0,56 +/- 0,4 mm/m. Der Faktor der Anisotropie der Varietät Oberpaol beträgt 2,66.

Die starke richtungsabhängige Anisotropie lässt sich durch die parallel zur Schichtung eingeregelten Tonminerale erklären. Insbesondere die Werksteinbank der Varietät „Lappen" lässt im Gefüge eine Schichtung erkennen, die so bei der Werkbank des Paol nicht festzustellen ist. Daher liegen die Messwerte senkrecht und parallel zur Schichtung bei Unterpaol und Oberpaol in der Regel enger beieinander. Man kann davon ausgehen, dass die recht hohe Streuung der Messwerte auf die natürliche Variationsbreite in der Gesteinsformation zurückzuführen ist.

Diagr. 16: *Hydrische Dilatation der Varietät „Unterpaol"*

Diagr. 17: *Hydrische Dilatation der Varietät „Oberpaol"*

Diagr. 18: *Hydrische Dilatation der Varietät „Lappen"*

5.5.1.2 Auswertung

Die senkrecht zur Schichtung gemessenen Werte der Varietät „Lappen" zeigen durchgängig Längenänderungen > 1mm/m mit Maximalwerten von 1,62 bis 1,75 mm/m. Diese Werte sind in Hinblick auf mögliche auftretende Spannungen im Gestein und den daraus resultierenden Schäden nicht zu vernachlässigen. Insbesondere die Anisotropie – also die durch Wassereinwirkung bedingte Längenänderung in unterschiedlicher Richtungen des Gesteins – kann einen Schadensprozess intensivieren.

5.5.2 Thermische Dilatation

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Die Messung der thermischen Dilatation wurde am Deutschen Bergbau-Museum Bochum (DBM Bochum)[12] durchgeführt. Hierzu wurden von den drei Varietäten Lappen, Unterpaol und Oberpaol jeweils Prismen mit den Kantenlängen 12 x 12 x 44 mm senkrecht und parallel zur Schichtung gefertigt. Die Messungen wurden pro Varietät und Richtung an jeweils acht Vergleichsproben durchgeführt. Die Prüfkörper wurden gleichförmig von -20 °C bis 60 °C (1 K/Min) erhitzt.
Die Längenänderung (Auflösung < 1 µm) wurde in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Der thermische Dehnungskoeffizient wird nach einem Erhitzungszyklus berechnet ($\alpha = \Delta l / l \times \Delta T$) (ZEISIG et al., 2002, S.64-79; KOCH et al., 2001). Die Anisotropie wurde anhand der Differenz der beiden Dehnungskoeffizienten in beide Richtungen (senkrecht und parallel zur Schichtung) festgestellt.

5.5.2.1 Untersuchungsergebnisse

Bei der Messung der thermischen Dilatation zeigen alle Prüfkörper gleichförmige Kurvenverläufe der Dehnung. Die Dehnungskoeffizienten sind bei allen drei Varietäten relativ niedrig und auch die jeweilige Anisotropie ist für ein calcitisches Gestein nicht sehr ausgeprägt (vgl. **Tab. 23**).

[12] Bericht 2020_31 MG: Sebastian Pewny, Dirk Kirchner, Georg Wange

Diagr. 19: *Thermische Dilatation der Varietät „Lappen"*

Diagr. 20: *Thermische Dilatation der Varietät „Unterpaol"*

Diagr. 21: *Thermische Dilatation der Varietät „Oberpaol"*

Tab. 23: *Ergebnisse - Thermische Dehnung*

Varietät	**Koeffizient der thermischen Dehnung [x-($10^{-6}K^{-1}$)**		**Anisotropie [%]**
	parallel zur Schichtung	senkrecht zur Schichtung	
Lappen	5,77	6,49	11,2
Unterpaol	6,19	6,81	9,1
Oberpaol	5,05	6,11	17,4

5.5.2.2 Auswertung

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Messungen zur thermischen Dilatation lassen keine sehr ausgeprägte Auswirkung von Temperaturveränderungen auf einen möglichen Schadensverlauf in Baumberger Kalksandstein schließen. Das thermische Dehnungsverhalten des Gesteins kann sich jedoch mit veränderlichen Feuchtegehalten der Umgebung stark verändern (vgl. Kapitel 6.6.6)

5.6 Frost-Tau- Wechsel

(Gerhard D´ham; HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen)

Frost-Tau-Wechsel (FTW) wurden an je 12 Prismen der drei Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen mit den Nennabmessungen 16 * 4 * 4 cm aus bruchfrischem Baumberger Kalksandstein (BKS) durchgeführt. Während bergfeuchter BKS als sehr frostempfindlich gilt, wird die Frostgefährdung von verbautem BKS in der Literatur als gering eingestuft oder nicht thematisiert. (VISSER & MIERWALD., 1998, S. 274)
Die nach den Vorgaben der geltenden Norm (DIN EN 12371:2010-07) bei Atmosphärendruck getränkten Probekörper wurden in Folienbeutel eingeschweißt, um die FTW möglichst arbeits- und zeitsparend in einem Klimaschrank durchführen zu können. Zur Feststellung von Veränderungen an den Gesteinskörpern dienten die visuelle Begutachtung, die Ermittlung der Wasseraufnahmegrade und der dynamischen Elastizitätsmoduln vor und nach den FTW.
Nach 30 und auch nach 50 FTW-Zyklen waren keinerlei Anzeichen einer Strukturschädigung festzustellen. Selbst bei einer Vervielfachung der FTW unter identischer Versuchsdurchführung schien dies nicht aussichtsreich.
Nach erfolgreicher Absolvierung von Vortests wurde daraufhin eine veränderte Tränkung mit Vakuumbeaufschlagung durchgeführt, um den Wassersättigungsgrad und damit die Gefügebelastung im zyklischen Frost-Tau-Wechsel deutlich zu steigern. Nach 50 weiteren Zyklen war eine Verminderung des dynamischen E-Moduls um ca. 15 % zu verzeichnen. Nach 100 weiteren FTW traten makroskopisch erkennbare, schichtungsparallele Risse auf und der dynamische E-Modul war um ca. 25 % des Ausgangsniveaus gefallen. Weit deutlicher noch war die Verminderung des Ultraschall-E-Moduls rechtwinklig zur Schichtung um 80 bis 90 % bei allen Varietäten.

5.6.1 Prüfnormen zur Strukurschädigung von Naturstein mittels Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Ein ausreichender Frostwiderstand von tragenden Bauteilen aus mineralischen porösen Baustoffen ist für die Sicherheit und Nachhaltigkeit von Bauwerken in kalten und gemäßigten Klimazonen von großer Bedeutung. Auf nationaler wie europäischer Ebene gibt es eine Reihe von Prüfnormen für natürliche und künstliche Steine und Gesteinskörnungen, die Festlegungen für die Durchführung von Laborexperimenten mit einer übersteigerten Frostbeanspruchung enthalten, um quasi im Zeitraffer den Frostwiderstand von Baumaterialien objektiv feststellen zu können und die Vergleichbarkeit einschlägiger Untersuchungsergebnisse sicherzustellen. Für die Natursteinprüfung sind hier folgende Normen zu nennen:

- DIN 52104-1:1982-11 Prüfung von Naturstein: Frost-Tau-Wechsel-Versuch. Verfahren A bis Q (zurückgezogen 2007-06, ersetzt durch DIN EN 12371)
- DIN EN 12371:2010-07 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes

Die DIN EN 12371 in ihrer derzeit gültigen Fassung unterscheidet zwischen zwei Prüfarten für Natursteine, eine kürzere technologischen Prüfung zur Feststellung von Änderungen verschiedener Festigkeitskennwerte infolge von FTW, bei der jeweils 43 Prüfkörper erforderlich sind, deren Form sich nach den Prüfnormen der zu ausgewählten Festigkeitskennwerte richtet, und einer mit maximal 168 Zyklen zeitaufwendigeren Identifizierungsprüfung, für die mindestens 7 Probekörper der Abmessungen 50 * 50 * 300 mm mit einer Ausrichtung der Anisotropieebene parallel zur Längsachse vorzusehen sind. Bei beiden Prüfarten werden die Prüfkörper zunächst bei 70° C auf Massekonstanz getrocknet ($\Delta M_{24\pm2h} <$ 1‰) und anschließend für 2 Tage unter Wasserüberdeckung in Leitungswasser getränkt. Die

sechsstündige Befrostung der Prüfkörper erfolgt an der Luft (wobei die an einem Prüfkörper zu messende Kerntemperatur zwischen -8 und -12° C liegen soll), das Auftauen für weitere 6 h unter Wasser (bei einer zu erreichenden Kerntemperatur zwischen +5 und +20° C).
Zur Feststellung von Veränderungen durch die FTW sind für die Identifizierungsprüfung nach DIN EN 12371 vor Beginn der Wechsellagerung sowie nach 14, 56, 84, 140 und 168 Zyklen jeweils nach erneuter Trocknung bei 70° C auf konstante Masse folgende Untersuchungen vorgesehen:

- Sichtprüfung mit einer Bewertung nach vorgegebener, fünf Stufen umfassender Skala
- Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls

Die FTW-Beanspruchung wird beendet, sobald zwei oder mehr von sechs Prüfkörpern eine Abnahme des E-Moduls um 30 % und/oder Rissweiten > 0,1 mm und/oder Ablösung von Fragmenten > 30 mm^3 aufweisen.

Die ältere DIN 52104-1 enthält 15 verschiedene Prüfverfahren für Natursteinkörper und Gesteinskörnungen, davon 6 Verfahren (A bis F) für Natursteinkörper regelmäßiger Formgebung (mindestens 5 Bohrkerne oder gesägte Prismen mit Durchmessern und Kantenlängen von 50 mm). Die Verfahren unterscheiden sich einerseits durch die Intensität der Wassersättigung (a: mäßige Durchfeuchtung, b: starke Durchfeuchtung, c: Wassertränkung im Vakuum mit 30 mbar Restdruck) und andererseits durch die Art der Befrostung bei -20° C entweder an Luft oder unter Wasser. In beiden Verfahrensvarianten tauen die Gesteinskörper in Wasser liegend auf. Die Tränkung mit luftfrei gekochtem Leitungswaser erfolgt stets nach Trocknung der Proben für 24 h bei 110° C, und zwar bei a: durch Untertauchen für 2 h, bei b: durch Untertauchen für 24 h und bei c: durch Evakuieren der getrockneten Probekörper für 2 h bei 30 mbar Restdruck, anschließendem Zuleiten des luftfrei gekochten Leitungswassers innerhalb 0,5 h bei Aufrechterhaltung des Vakuums bis zu einer Wasserüberdeckung von 20 mm, umgehendem Aufheben des Vakuums und Fortführung der Unterwasserlagerung für 1 h. Zur Befrostung in Luft werden die Probekörper für mindestens 4 h im Kälteschrank bei Temperaturen zwischen – 15 und -22° C gelagert und anschließend für eine Stunde im Wasserbad von 20 ± 3° C aufgetaut.
10 FTW-Zyklen sind als Mindestanzahl angegeben, eine Höchstzahl ist Vereinbarungssache. Alle 5 Zyklen soll eine Sichtprüfung erfolgen (Risse, Kantenverluste und andere Veränderungen). Nach Versuchsabschluss ist erneut die Feucht- und Trockenmasse zu bestimmen. Zusätzlich kann eine Druckfestigkeitsprüfung im Vergleich zu nicht befrosteten Prüfkörpern erfolgen (→Verdoppelung der Probekörperanzahl erforderlich). Im Prüfbericht ist die Art der Tränkung, Anzahl der FTW, Art der Befrostung, Menge der Absplitterungen in M.-% sowie Art, Umfang und Zeitpunkt der visuell beobachteten Frostschäden anzugeben.

Beide Prüfnormen stellen durch ihren Verfahrensablauf sicher, dass der initiale Wasseraufnahmegrad während der gesamten Dauer der FTW-Prüfung aufrechterhalten oder sogar allmählich gesteigert wird. Jedoch ist der manuelle und zeitliche Aufwand durch den ständigen Wechsel zwischen Luft- und Wasserlagerung sehr hoch. Für die Durchführung von 100 FTW-Zyklen ist bei diesem Verfahrensablauf im Rahmen einer normalen Arbeitswoche von 40 h ein Zeitraum von 20 Wochen erforderlich.
Für eine beschleunigte und arbeitssparende Durchführung ist daher eine Realisierung der Temperaturwechsel ausschließlich an der Luft bei Unterbindung von Verdunstungsverlusten durch Einschweißen in Folie erforderlich.

5.6.2 Versuchsdurchführung

5.6.2.1 Überblick

Einen Überblick zu den FTW-Versuchen gibt die nachfolgende Tabelle:

Tab. 24: *Übersicht zu den FTW-Beanspruchungen der BKS-Kollektive*

Versuchs-Phase	Probekörper	Tränkung	Zeitraum der Beanspruchung	Anzahl FTW-Zyklen
I	1 - 12 UP/OP/L	bei Normaldruck	14.01.-13.02.2021	50
II	1 - 9 UP/OP/L 13-15 UP/OP/L	mit Vakuum	30.03-28.04.2021	50
III	1 - 9 UP/OP/L 13-15 UP/OP/L	mit Vakuum	30.07-18.10.2021 (mit Unterbrechung 13.09.-05.10.2021)	100
	1 - 9 UP/OP/L			200
	10-12 UP/OP/L			50
	13-15 UP/OP/L			150

Nach der Versuchsphase I wurden 3 Probekörper je Varietät als Rückstellprobe ausgesondert (Nr. 10 - 12) und durch 3 frische Probekörper ersetzt (Nr. 13 – 15). Hierdurch ergeben sich Unterschiede in der Anzahl der FTW-Zyklen, denen die Prüfkörper ausgesetzt waren (50, 150 und 200 Temperaturwechsel).

5.6.2.2 Probekörper

Je Varietät Unterpaol, Oberpaol und Lappen wurden vom LWL zunächst 12, spätere 3 weiter Prismen mit den Nennmaßen 160 * 40 * 40 mm zur Verfügung gestellt. Die realen Prüfkörpermaße variierten in der Länge zwischen 157,1 und 162,8 mm, in Tiefe bzw. Höhe zwischen 36,7 und 43,6 mm und im Volumen zwischen 222,6 und 280,2 cm^3. Die Schichtungsorientierung verlief stets parallel zu Länge und Tiefe.

5.6.2.3 Trocknung

Die Probekörper wurden vor den Tränkungen zu Beginn jeder Versuchsphase bzw. an deren Ende bei 60° C bis zur Massekonstanz getrocknet (Masseänderung innerhalb 24 h < 1‰). Die relativ niedrige Trocknungstemperatur wurde gewählt, um eine Schädigung der quellfähigen Tonminerale auszuschließen. Abkühlung und Zwischenlagerung erfolgte in geschlossenen Exsikkatoren über Silikagel. Die Trocknung vor Anlieferung in Hildesheim, d. h. vor der ersten Versuchsphase erfolgte improvisiert (im Backofen) und verkürzt (nur für eine Nacht). Aus zeitlichen Gründen konnte die Probekörper an der HAWK nicht nachgetrocknet werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die Probekörper vor Beginn der Versuchsphase I einen höheren Restwassergehalt hatten.

5.6.2.4 Tränkung

Die Tränkung für Versuchsphase I orientierte sich an den Bestimmungen der derzeit gültigen Norm DIN EN 12371:2010-07[13], jedoch mit einigen Abweichungen. Die Probekörper wurden in Wannen auf Dreikantleisten gelagert und zunächst für 16 h mittels Einstelltränkung kapillar getränkt. Danach lagerten sie 55 ± 2 h unter Wasserüberdeckung. Verwendet wurde normales Leitungswasser.
Zur Steigerung des Sättigungsgrades und folglich der Gefügebelastung bei FTW-Beanspruchung wurden die Gesteinskörper in Versuchsphase II und III mit Vakuumunterstützung in Anlehnung an DIN EN 1936:2007-02[14] getränkt: Die Probekörper wurden in einem großen Exsikkator mittels Wasserstrahlpumpe für 2 ± 0,2 h auf einen Restdruck von 20 ± 7 mbar evakuiert. Anschließend wurde innerhalb von 15 Minuten unter Wahrung des Unterdruckes abgekochtes, auf Raumtemperatur abgekühltes destilliertes Wasser zugeleitet, bis alle Probekörper unter Wasserüberdeckung lagen. Nach weiteren 15 Minuten wurde das Vakuum aufgehoben und die Gesteinskörper noch für weitere 24 ± 2 h unter Wasser gelagert. Aufgrund der Menge der Prüfkörper musste die Vakuumtränkung in zwei getrennten Chargen zeitlich versetzt durchgeführt werden.
Im Anschluss an die Tränkung wurden die Probekörper aus dem Wasserbad entnommen, der Wasserüberschuss auf ihrer Oberfläche mit einem feuchten Schwammtuch abgetupft und die mattfeuchten Proben gewogen.

5.6.2.5 Folierung

Um Verdunstungsverluste weitestgehend zu minimieren wurden die Gesteinskörper nach der Wägung umgehend einzeln luftdicht in Folie eingeschweißt, wie es bereits von Weiss in seiner Dissertation 1992 beschrieben wurde. (WEISS, 1992, S.48). Hierfür wurde ein Vakuumschweissgerät und eine PA/PE-Verbundfolie der Stärke 150 µm verwendet.[15]

5.6.2.6 Frost-Tau-Wechsel-Lagerung

Die wassergesättigten, in Folienbeutel eingeschweißten Probekörper wurden in das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege in Hannover gebracht und von Herrn Dipl.-Laborchem. Rolf Niemeyer in einem Klimaschrank Typ C 340, -40 der Fa. Weiss Umwelttechnik einer Temperaturwechsellagerung unterzogen. Jeder Temperaturzyklus dauerte 14 h und umfasste 1 h Lagerung bei +20° C, 6 h kontinuierliche Temperaturabsenkung auf -15° C, 1 h Haltezeit bei – 15° C und 6 h kontinuierlichen Temperaturanstieg auf +20° C. Zur Kontrolle des vorgesehenen Ablaufs wurde die Lufttemperatur im Klimaschrank in 15 Minuten-Schritten kontinuierlich aufgezeichnet. Eine Messung der Kerntemperatur in einem Referenzprüfkörper mittels eines PT100-Fühlers wurde nicht vorgenommen. Aufgrund des begrenzten Gesamtprobekörpervolumens von < 10 dm^3, der geringen Dicke der verwendeten Prüfkörper von ca. 40 mm, der relativ langen Dauer der Temperaturwechselzyklen und der Leistungsfähigkeit des Klimaschrankes geht der Verfasser von einem vollständigen Durchfrieren aller Probekörper während der Frostphasen aus.

[13] DIN EN 12371:2010-07 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes
[14] DIN EN 1936:2007-02 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität
[15] Caso VC 10 Vacuum System und Caso Profi-Folienrollen

5.6.3 Organoleptische Untersuchung

5.6.3.1 Haptische Begutachtung

Nach Abschluss der einzelnen Versuchsphasen und Trocknung der Prüfkörper bis zur Massekonstanz wurde die Probekörperoberflächen mittels Tastsinns qualitativ auf körnige Ablösung untersucht (Abmehlen / Absanden).

5.6.3.2 Makroskopische Untersuchung

Bereits beim Auspacken der Probekörper wurden die Folienverpackungen auf abgelöstes Gesteinsmaterial kontrolliert. Nach Trocknung der Probekörper erfolgte eine Inspektion der Prüfkörperoberflächen auf Risse, Kantenabrundungen, Ablösung von Fragmenten und Zerbrechen, wobei neben der Betrachtung mit dem bloßen Auge auch eine Stirnlupe mit 10 Dioptrien eingesetzt wurde (3,5-fache Vergrößerung). Teil der makroskopischen Untersuchung war eine exemplarische fotografische Dokumentation der Oberflächen ausgewählter Probekörper nach Abschluss von Versuchsphase III.

5.6.4 Messungen

5.6.4.1 Gravimetrie

Die Probekörper wurden während des Versuchsablaufs mehrfach mit einer Auflösung von 0,01 g gewogen[16] (Trockenmasse nach Erreichen der Massekonstanz, Feuchtmasse nach Abschluss der Tränkung, Feuchtmasse nach Einschweißen in Folie, Feuchtmasse in Folie nach durchlaufenen Frost-Tau-Wechseln, Feuchtmasse nach FTW und Abnahme der Folie, Trockenmasse nach erneuter Trocknung). Mittels dieser Werte konnten die Wasseraufnahmegrade in M.-% in Abhängigkeit von Tränkungsart und Versuchsphase ermittelt und die Höhe etwaiger Feuchteverluste trotz Folieneinhüllung im Verlauf des FTW-Versuchs bestimmt werden. Auch etwaige Masseverluste an den Prüfkörpern infolge von Frostschäden hätten so erfasst werden können.

5.6.4.2 Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls parallel zur Schichtung

Die Probekörper wurden vor Versuchsbeginn und nach Ablauf der Versuchsphasen I bis III jeweils nach Trocknung einer Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls mittels Ultraschall im Dehnwellenverfahren unterzogen.[17] Dabei werden an die Kopfflächen der stabförmigen Natursteinprismen Dehnwellenschallwandler trocken angekoppelt und mit einem breitbandigen Ultraschallsignal Resonanzschwingungen angeregt. In einem ersten Messschritt wird die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle bestimmt. Anschließend wird vom Auswerteprogramm[18] mittels FFT-Analyse die Resonanzfrequenz der Dehnwelle bestimmt und die Dehnwellengeschwindigkeit V_D abgeleitet.

Der dynamische E-Modul berechnet sich dann nach der Formel:

$$E_{dyn} = V_D^2 * \text{Rohdichte} \qquad (5.7.1)$$

[16] Sartorius BCE3202-1S

[17] Koffer-Messsystem UKS D der Fa. Geotron-Elektronik aus Pirna mit US-Generator USG 40, PicoScope 2206A und Dehnwellenmessköpfe UPG-D / UPE-D

[18] Lighthouse DW, Version 1.4 vom 11.01.2017, Geotron-Elektronik

5.6.4.3 Bestimmung des Ultraschall E-Moduls auf Grundlage der Longitudinalwellengeschwindigkeit

Nach Beendigung von Versuchsphase III entstand der Wunsch, zusätzlich zum dynamischen E-Modul parallel zur Schichtung auch einen Elastizitätsmodul senkrecht zur Schichtung zu bestimmen, um die Auswirkung schichtungsparallel auftretender Risse auf das Elastizitätsmodul messtechnisch besser erfassen zu können. Hierzu wurden mit identischer Hard- und Software gearbeitet wie in (Kapitel 5.6.4.2) beschrieben. Die Ankopplung der Schallwandler erfolgte jedoch nunmehr an Ober- und Unterseite der Prismen (3 Messungen je Prisma, rechtwinklig zur Schichtung). Da sich bei dieser Durchschallungsgeometrie keine Resonanzschwingungen ausbilden, wurde aus der Longitudinalwellengeschwindigkeit V_p ein sogenannter Ultraschall-E-Modul nach folgender Formel berechnet:

$$E_{US} = V_P^2 * \text{Rohdichte} \qquad (5.7.2)$$

Um eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit zu schichtungsparallelen E-Modul-Messergebnissen sicherzustellen, wurden alle Prismen zusätzlich ein weiteres Mal in Längsrichtung durchschallt und ebenfalls der schichtungsparallele Ultraschall-E-Modul berechnet.

5.6.5 Mikroskopische Untersuchung

Zur Rissbreitenbestimmung wurden ausgewählte Probekörperoberflächen mit einem Auflicht-Digital-Mikroskop bei 50-facher Vergrößerung untersucht.[19]

5.6.6 Organoleptische Befunde

5.6.6.1 Haptische Begutachtung

Die Probekörper aller 3 Varietäten weisen bereits nach den ersten 50 FTW ein ganz leichtes Abmehlen auf, das sich nach der II. und v. a. nach der III. Versuchsphase zwar deutlich verstärkt, aber auf die äußerste Oberfläche der Prismen beschränkt bleibt (<< 1 mm). Es gibt keine haptisch wahrnehmbaren Indizien für eine tiefergreifende Entfestigung.

5.6.6.2 Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen

Das Abmehlen ließ sich auch visuell als Anhaftung von Gesteinsmehl an der Tütenwandung nachvollziehen und verstärkte sich mit jeder Versuchsphase. Schäden wie Kantenabrundungen, Absplittern von Prismenteilen oder gar das Zerbrechen von Prismen traten zu keinem Zeitpunkt des Experiments auf. Die Rückstellprobekörpern 10-12 aller Varietäten, die nur in der ersten Versuchsphase 50 FTW ausgesetzt waren, wiesen keinerlei Risse auf. Jedoch ließen sich nach der 3. Versuchsphase an einer Reihe von Prismen Risse parallel zur Schichtung feststellen, wobei folgende varietätenspezifische Differenzierung zu beobachten war:

- Die Varietät Unterpaol weist an allen Prismen über die gesamten Seitenflächen gleichmäßig verteilt meist relativ viele kurze und einige längere Risse auf, letztere in unterschiedlicher Anzahl von 1 bis 12 Stück. An 4 der 12 Prismen treten darunter auch Rissweiten > 0,1 mm auf.
- Die Varietät Oberpaol weist ebenfalls an allen Prismen meist gleichmäßig verteilt wenige bis mittelhäufig auftretene kurze und an 10 von 12 Gesteinskörpern auch längere Risse auf, letztere in einer geringeren Anzahl zwischen 1 und 6. Die Rissweiten sind alle < 0,1 mm.

[10] Keyence VHX 500 f

- Bei der Varietät Lappen treten an den meisten Prismen nur sehr wenige, ungleichmäßig verteilte, kurze Risse auf. Nur ein Prisma weist auch 13 lange Risse mit einer Rissweite < 0,1 mm auf.

Nachstehend illustrieren einige Beispielfotos die auftretenden Rissbilder.

Varietät Unterpaol | Varietät Oberpaol | Varietät Lappen

Abb. 29: *exemplarische Rissbilder nach Versuchsphase III im Vergleich (Fotos: HAWK)*

5.6.7 Messergebnisse

5.6.7.1 Wasseraufnahmegrad

Die arithmetischen Mittelwerte der **Tab. 25** zeigen Dreierlei:

1. Die Vakuumtränkung in Versuchsphase II steigert die massebezogenen Wasseraufnahmegrade bei allen drei Varietäten im Vergleich zu Versuchsphase I um ca. 16 %.
2. Das Einschweißen der Prismen in Folie begrenzt wirkungsvoll eine Verdunstung des aufgenommenen Wassers während der zyklischen FTW-Belastung. Der Wassergehalt in den Gesteinskörpern nimmt während der 50 FTW der Versuchsphase II durchschnittlich nur um 1 % ab, während der 100 FTW der Versuchsphase III nur um 2 %.
3. Der durchschnittliche Wasseraufnahmegrad ist zu Beginn von Versuchsphase 3 im Vergleich zu Versuchsphase II bei gleicher Trocknungs- und Tränkungsdurchführung um etwa 3 % gestiegen.

Tab. 25: *Massebezogene Wasseraufnahmegrade der BKS-Kollektive*

	I vor FTW	II vor FTW	Δ Wm,v-Wm,a Phase II - Phase I	II nach FTW	Δ Wm,v vor -nach 50 FTW	III vor FTW	Δ Wm,v Phase III - Phase II	III nach FTW	Δ Wm,v vor -nach 100 FTW
	[M.-%]	[M.-%]	[%]	[M.-%]	[%]	[M.-%]	[%]	[M.-%]	[%]
UP	11	12,7	15,5	12,6	0,8	13,1	3,1	12,9	1,5
OP	10	11,6	16,0	11,5	0,9	11,9	2,6	11,7	1,7
L	7,2	8,4	16,7	8,3	1,2	8,7	3,6	8,5	2,3
Mittelwert			16		1		3		2

5.6.7.2 Dynamischer E-Modul parallel zur Schichtung

Diagr. 22: *Veränderung des dynamischer Elastizitätsmoduls im Verlauf des FTW-Versuchs*

Nach den ersten 50 FTW sind die E-Moduln aller Varietäten höher als im Vorzustand. Vermutlich ist dies auf den noch enthaltenen Wassergehalt der Prismen im Vorzustand zurückzuführen (unvollständige Trocknung). Die FTW-Zyklen der beiden nachfolgenden Versuchsphasen bewirken eine Absenkung der dynamischen E-Moduln bei jedem einzelnen Prisma. Diese Reduktionen betragen nach Versuchsphase II (Vakuumtränkung, 50 FTW) im Mittel für die Varietäten Unterpaol und Oberpaol 17 % und für die Varietät Lappen 13 %, nach Versuchsphase III (Vakuumtränkung und zusätzliche 100 FTW) nochmals 12 % für Varietät Unterpaol, 9 % für Varietät Oberpaol und 16 % für Varietät Lappen. In der Summe von Versuchsphase II und III beträgt die Abnahme für Unterpaol und Lappen 27 %, für Oberpaol 24 %.

5.6.7.3 Ultraschall E-Modul parallel und rechtwinkelig zur Schichtung

Entsprechend des in Kapitel 5.6.2.1 dargestellten Versuchsablaufs basieren die in **Diagr. 23:** dargestellten Mittelwerte auf einer stark divergierenden Anzahl von Einzelergebnissen (n=3 und n=9). Da die Streubreiten der Einzelwerte um diese Mittelwerte mit Variationskoeffizienten bis 25 % verhältnismäßig gering sind, wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dadurch nicht in Frage gestellt.
Für alle drei Varietäten gilt, dass die Ultraschall-E-Moduln rechtwinklig zur Schichtung nach Versuchsphase I ca. 15 % geringer sind als parallel zur Schichtung. Nach Abschluss von Versuchsphase III beträgt die durchschnittliche Differenz der E_{US}-Moduln dagegen 80 %, z. T. annähernd 90 %. Der Ultraschall-E-Modul ist demnach durch die FTW-Beanspruchung rechtwinklig zur Schichtung wesentlich stärker reduziert worden als parallel zur Schichtung.

Diagr. 23: *Veränderung des Ultraschall E-Moduls parallel und senkrecht zur Schichtung als Funktion der absolvierten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln.*

Aber auch schichtungsparallel sind die Ultraschall-E-Moduln vermindert worden, wobei hier durchaus Unterschiede zwischen den verschiedenen Varietäten auffallen: Die Varietät Unterpaol büßt schichtungsparallel fast 50 % ihres vergleichsweise niedrigsten Ausgangswertes ein, bei der Varietät Oberpaol vermindert sich der E_{US} um etwa ein Drittel, während der höchste Anfangswert der Varietät Lappen nur um 10 bis 25 % reduziert wird.

6. MODUL : ERKENNEN

6.1 Objektbeispiele

(Friederike Funke, Birte Graue, LWL-DLBW; Frank Schlütter, Leibniz-IWT/MPA Bremen)

An insgesamt 30 ausgewählten Objekten in Westfalen werden die typischen Schadensphänomene an Baumberger Kalksandstein in unterschiedlichen Verwitterungsstadien im MODUL : ERKENNEN erfasst. An Bauwerken und im Labor werden restauratorische, naturwissenschaftliche und materialtechnische Untersuchungen und Entwicklungen zur Erfassung der Schäden an Natursteinen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen zur Klärung und Beurteilung von Schadensprozessen herangezogen werden. Darüber hinaus erfolgt eine Erfassung und Evaluation von bisherigen Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an Denkmälern. Anhand der beispielhaften Untersuchungen an verschiedenen Objekten soll ein Untersuchungsprogramm entwickelt werden im MODUL: ERKENNEN als Teil des praxisorientierten Leitfadens.

Tab. 26: *Übersicht der im MODUL : ERKENNEN untersuchten Objekte.*

	Kürzel	**Ort**	**Objekt**	**ERKENNEN**
1	Ah-a	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Löwenportal	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Perkussionsuntersuchung • Ansprühtest • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
2	Ah-b	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Fassade/Freitreppe Innenhof Ostfassade	• Fotodokumentation
3	Ah-c	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Freitreppe Westfassade	• Objektbeschreibung
4	Al	**Ahlen**	**Stadtpark Ahlen,** Kreuzigungsgruppe	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene
5	HSB	**Borken-Weseke**	**Haus Schmeing,** Fensterlaibung	• Salzanalyse (MPA)
6	HS-a	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Vorburg Seitentor, Nord	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Perkussionsuntersuchung • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Salzanalyse • Mikroskopie
7	HS-b	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Vorburg Nordflügel, Fassade	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene
8	HS-c	**Havixbeck**	**Haus Stapel** Torhaus	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode

	Kürzel	Ort	Objekt	ERKENNEN
				• Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen Bohrwiderstand • Mikroskopie • Bohrkernentnahme • RD,OP, WA (Tauchwägung)
9	HS-d	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Kreuzigungsgruppe	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen Bohrwiderstand
10	HA-a	**Horstmar**	**Haus Alst**- Nordfassade Haupthaus	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Salzanalyse • Mikroskopie
11	HA-b	**Horstmar**	**Haus Alst** - Eingangsportal	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
12	HA-c	**Horstmar**	**Haus Alst** - Wappensteine	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Salzanalyse
13	MP-a	**Münster**	**Kirche St. Petri** Bauzier/Adler am Chor	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
14	MP-b	**Münster**	**Kirche St. Petri** Westportal/linkes Kapitell	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
15	MS-a	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel, Ostfassade, Risalit, freistehende Dachvase	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Mikroskopie

	Kürzel	Ort	Objekt	ERKENNEN
				• RD, WA, OP (Tauchwägung)
16	MS-b	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel Ostfassade, Risalit	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen Bohrwiderstand • Mikroskopie
17	MS-c	**Münster**	**Schloss Münster,** Mittelrisalit, Figurengruppe	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Tropfenaufsetzmethode • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
18	NN-a	**Nordkirchen**	**Schlosspark Nordkirchen**, nördlicher Parkausgang, Frauentor	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Bohrwiderstand • Salzanalyse
19	NN-c	**Nordkirchen**	**Schloss Nordkirchen,** Freitreppe, Corps de Logis, Mittelrisalit östliche Chimären	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Bohrwiderstand
20	DS-a	**Rosendahl-Darfeld**	**Schloss Darfeld**, Galeriebau	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Perkussionsuntersuchung • Ansprühtest (keine verwertbare Aussage) • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Bohrwiderstand
21	DS-b	**Rosendahl-Darfeld**	**Schloss Darfeld,** Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
22	SH-a	**Sassenberg**	**Schloss Harkotten Haus von Korff** Skulptur des Hl. Johannes von Nepomuk	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen (eingeschränkt möglich) • Erfassung der Schadensphänomene • Perkussionsuntersuchung • Ansprühtest • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Bohrwiderstand
23	SH-b	**Sassenberg**	**Schloss Harkotten Haus von Korff** Skulptur der Anna im Innenraum	• Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Salzanalyse

	Kürzel	**Ort**	**Objekt**	**ERKENNEN**
24	BT-E	**Telgte**	**Am Emstor, Bildstock,** Bildstock	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen • Tropfenaufsetzmethode • Bohrwiderstand
25	BT-M	**Telgte**	**An der Marienlinde,** Bildstock	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen • Karsten´sches Prüfröhrchen • Tropfenaufsetzmethode • Bohrwiderstand
26	BT-N	**Telgte**	**Am oberen Emswehr,** Skulptur Nepomuk	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • Wasseraufnahme- Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen
27	BT-R	**Telgte**	**Freistehend an der Bundesstraße 64,** Bildstock	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • (fotografisch)
28	BT-RB	**Telgte**	**Am Raestruper Bahnhof,** Bildstock	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Erfassung der Schadensphänomene • (fotografisch)
29	AV	**Vreden**	**Alte Vikarie,** Portal	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Schadenszuordnung
30	KV	**Vreden**	**Am Kalvarienberg,** Wegkreuz	• Restaurierungsgeschichte dokumentiert • Lokalisierung früherer Maßnahmen • Erfassung der Schadensphänomene

6.2 Benennung der Maßnahmen für das MODUL: ERKENNEN

Die folgenden Untersuchungsmethoden wurden im MODUL : ERKENNEN berücksichtigt:

a. Restaurierungsgeschichte erfassen
b. Qualitative und quantitative Feststellung früherer Maßnahmen
c. Erfassung und Zuordnung der Schadensphänomene
d. Perkussions-Untersuchungen zur Detektion von Hohlstellen
e. Benetzen der Objektoberfläche mit Wasser-Sprühnebel
f. Tropfenaufsetzmethode
g. Messung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme mittels Karsten-Röhrchen
h. Bohrwiderstandsmessungen zur Erstellung von Festigkeitsprofilen
i. Probenentnahmen für begleitende naturwissenschaftliche Untersuchungen
    1. Mikroskopische Gefügeanalyse
    2. Salzanalyse

6.3 Methodik ERKENNEN

a. Restaurierungsgeschichte

Methodik: Aktenrecherche
Ergebnis: Zusammenfassende Beschreibung der objektrelevanten Angaben zur Bau- und Restaurierungsgeschichte. In der schriftlichen Beschreibung liegt der Schwerpunkt auf der Auflistung der Materialien und Methoden früherer Restaurierungsmaßnahmen, soweit diese dokumentiert wurden.
Aussage: Wichtig sind Hinweise auf frühere Hydrophobierungs-/Festigungsmaßnahmen bzw. Behandlungen, welche in früheren Jahren als „Imprägnierung" bezeichnet wurden. Zusätzlich kann eine auffallend hohe Anzahl von aufeinanderfolgenden Maßnahmen z.B. seit den 1960er Jahren als Hinweis auf hohes Schadenspotential und somit die Notwendigkeit eines engmaschigen Monitorings des betreffenden Objektes gewertet werden.

b. Qualitative und quantitative Feststellung früherer Maßnahmen

Methodik: Abgleich von Restaurierungsgeschichte und Bestand/Kartierung/Fotografie
Ergebnis: Lokalisierung von Art und Ausmaß früherer Maßnahmen, wie z. B. Überarbeitungen in Form von spannungsreichen Beschichtungen, Ergänzungen etc., anhand des Abgleichs von Restaurierungsgeschichte mit dem Bestand vor Ort.
Aussage: Art und Ausmaß früherer Maßnahmen lassen eine Aussage zu früherem Schädigungsgrad und Schadensphänomenen zu. Im Abgleich mit dem aktuellen Zustand des Objektes lässt sich ein Rückschluss auf das Maß der fortschreitenden Verwitterung ziehen.

c. Erfassung und Zuordnung der Schadensphänomene

Methodik: Kartierung/Fotografie
Ergebnis: Lokalisierung von Art und Umfang der vorhandenen Schäden auf Grundlage des Schadensglossars.
Es werden die für den Baumberger Kalksandstein relevanten Schadensphänomene benannt und in einem Schadensglossar bildlich und schriftlich dargestellt. Im Rahmen der Zustandserfassung vor Ort werden die festgestellten Schadensphänomene auf Grundlage des Schadensglossars in einer Kartierung dokumentiert.
Aussage: Zum einen ist das Ausmaß der aktuellen Schädigung qualitativ und quantitativ festzustellen. Zum anderen ist im Vergleich mit der Kartierung der früheren Maßnahmen am Objekt eine mögliche Veränderung der fortschreitenden Verwitterung festzustellen.

d. Perkussions-Untersuchungen

Methodik: Unter Berücksichtigung der individuellen Oberflächenstabilität wird durch Abklopfen mit dem Finger oder mit einem massiven Metallgegenstand eine Resonanz der Luftschichten in Hohlstellen unter der Oberfläche erzeugt, wodurch diese akustisch wahrnehmbar werden.
Ergebnis: Die Erfassung der Lokalisierung und des Umfanges dieser akustischen Eindrücke werden in einer Zustands-/Schadenskartierung von Hohlstellen graphisch dokumentiert.
Aussage: Im Rahmen der Zustandserfassung vor Ort können neben rein optisch wahrnehmbaren Schalenbildungen auch optisch nicht wahrnehmbare Schäden festgestellt werden. Diese ergänzende Zustandsuntersuchung ist wichtig zur Erfassung des tatsächlichen Umfanges und Klassifizierung möglicher Schalenbildungen.

e. Benetzen der Objektoberfläche mit Wasser-Sprühnebel

Methodik: Das Objekt wird mit Wassernebel in unterschiedlichen Bereichen (z. B. frische Fehlstellen/Bruchkanten) angesprüht, um eine mögliche Hydrophobie festzustellen.
Ergebnis: Die Oberfläche zeigt stärkere und schwächere Verdunkelungen – oder eine Bildung eines Wasserfilms – aufgrund der unterschiedlichen Feuchteaufnahmen, was als Momentaufnahme am Objekt fotografisch dokumentiert wird.
Aussage: Das Aufsprühen soll die Benetzbarkeit und Saugfähigkeit einer Oberfläche optisch zeigen und einer ersten Feststellung von möglichen hydrophoben Eigenschaften der Oberflächen dienen.
Aussage: Verdunkelungen zeigen ein höheres Wasseraufnahmevermögen im Vergleich zu hell stehenden Flächen, die auf eine mögliche hydrophobe Eigenschaft der Oberfläche hinweisen.

f. Tropfenaufsetzmethode

Methodik: Aufsetzen möglichst kleiner Wassertropfen auf die Steinoberfläche mittels Kolbenhubpipetten, um die Größe der Wassertropfen zu standardisieren, damit die Dauer der Flüssigkeitsaufnahme vergleichbar ist.
Ergebnis: Schriftliche Dokumentation der Tropfenform (z. B. kugelförmig, halbrund, abgeflacht, breit laufend) und des Saugverhaltens (z. B. rasch saugend oder saugend oder wasserabweisend).
Aussage: An Steinschalen oder Bruchstücken von Steinen geschädigter Bereiche können hydrophobe Abschnitte ermittelt werden, was einen Hinweis auf eine frühere wasserabweisende Imprägnierung geben kann. Kombiniert werden eine vereinfachte Kontaktwinkelbeurteilung durch Beschreibung der Kugelform und eine qualitative Beschreibung des Wasseraufnahmeverhaltens.
Der Tropfenaufsetzmethode kann durch vorhandene Schmutzablagerungen und biologische Besiedelung verfälscht werden, daher sind frische Bruchflächen notwendige Voraussetzung für begründete Aussagen.
Eine (chemische) Hydrophobierung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Benetzbarkeit des Steines, was zu einer Abnahme des Kontaktwinkels eines aufgesetzten Wassertropfens führt. Das heißt, ein kugelförmiger Tropfen zeigt insbesondere auf einer frischen Bruchfläche eine bestehende Hydrophobie, die ein Hinweis auf eine frühere hydrophobierende Maßnahme sein kann. Die Breite der wasserabweisenden Zone kann wiederum einen Hinweis auf die Tiefe der Hydrophobie geben.
Ein charakteristisches „in die Breite Auseinanderlaufen" des aufgesetzten Wassertropfens zeigt an, dass das Wasser nicht tiefer eindringt, bedingt durch nichthydrophobe Eigenschaften eines µm-schmalen oberflächennahen Gefügeabschnitts. Dieser mögliche Abbau einer früheren Hydrophobie kann neben einem UV-induzierten Abbau eines früheren Hydrophobierungsmittels auch durch sekundäre wasserabweisende Effekte, z.B. durch Schmutzauflagerungen und/oder biologische Besiedelung, hervorgerufen werden.

g. Messung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme nach Karsten

Methodik: Das Prüfröhrchen nach Karsten wird mit dem nach einer Seite offenen und mit einem flachen Rand versehenen Glaszylinder an der Objektoberfläche aufgekittet und mit Druck an die Oberfläche gepresst. Nach dem Aufkitten wird die Vorrichtung über das gradierte Messrohr zügig mit einer Spritzflasche bis zur Linie von 0 ml mit deionisiertem Wasser befüllt und die Stoppuhr gestartet. Nachfolgend werden in regelmäßigen Zeitabständen die aufgenommenen Wassermengen in ml und die dazugehörigen Eindringzeiten dokumentiert.
Ergebnis: Im Verlauf der Messung wird die aufgenommene Flüssigkeitsmenge in ml an der Skala des gradierten Rohrs abgelesen, was Auskunft über die Wasseraufnahmemenge pro Zeit an der getesteten Oberfläche gibt.
Aussage: Beim Baumberger Kalksandstein kann eine Wassermenge von <0,5 ml aufgenommen in 30 Minuten (gemessen mit ø 45 mm Karsten-Röhrchen) als Zeichen für hydrophobe

Oberflächeneigenschaften interpretiert werden. Die Messung wird stark beeinflusst durch Beschichtungen, Schmutzablagerungen und/oder biologische Besiedelung an der Oberfläche.

h. Bohrwiderstandsmessung

Methodik: Vertikale Positionierung des Bohrwiderstandsgerät (hier Drilling Resistance Measurement System (DRMS) der Fa. Sint Technology, Italien) an der Messstelle. Das Gerät besitzt zwei elektronisch gesteuerte Präzisionsmotoren, einen Drehmotor für die Bohrspindel und einen Schrittmotor für die Vorschubeinheit. Folgende Größen werden kontinuierlich gemessen:

- Andruckkraft [0-100 N]
- Bohrtiefe [0-50mm],
  (bei einer Auflösung von 0,01 mm)
- Drehzahl [20-1000 rpm]
- Bohrfortschritt [1-80 mm/min]

Drehzahl und Bohrfortschritt werden in der Software voreingestellt und während der Messung konstant gehalten. Als Bohrwiderstand ist die aufgewendete Kraft definiert, die in Abhängigkeit von Material und Bohrtiefe erforderlich ist, um den voreingestellten Bohrfortschritt konstant zu halten.
Ergebnis: Der gemessene Bohrwiederstand lässt anhand eines Bohrwiderstandsprofils auf die Festigkeit des beprobten Materials rückschließen.
Aussage: Nicht verwitterter Baumberger Kalksandstein ist ein sehr heterogenes Material und zeigt stark variierende Bohrwiderstände. Eine im Tiefenprofil am Objekt gemessene Bohrwiderstandskurve gibt einen Hinweis auf die Festigkeiten im Tiefenprofil des beprobten Objektbereichs.

i. Probenentnahmen zu begleitenden naturwissenschaftlichen Untersuchungen

Methodik:
Für begleitende naturwissenschaftliche Untersuchungen kommen je nach gewählter Analysemethode unterschiedliche Formen der Probenahme zum Einsatz.

1. Oberflächenparallele Schalen der Gesteinsoberfläche werden zur mikroskopischen Gefügeanalyse aus lose oder locker aufliegendem Material entnommen. Sowohl für die mikroskopische Untersuchung der Bauwerksoberfläche als auch des Tiefenprofils an entnommenen Bohrkernen werden Dünnschliffe gefertigt
2. Für die Salzanalyse zur Bestimmung im Tiefenprofil (Segmente) werden auf einem Spiralbohrer festgelegte Abschnitte aufgetragen. Das Bohrmehl wird anschließend abschnittsweise hinsichtlich des quantitativen Salzvorkommens untersucht. Für die Quantifizierung von oberflächennahen Salzen können Schalen oder Schuppen abgenommen und analysiert werden.

Ergebnis:

1. Polarisationsmikroskopie wird als Standardmethode zur optischen Identifizierung von Mineralen und zur Texturanalyse genutzt. Somit kann einerseits die mineralogische Zusammensetzung der Probe bestimmt, zum anderen können aus den Gefügemerkmalen wie Struktur, Textur und Phasenbestand Rückschlüsse auf die Bildungsprozesse gezogen werden. Die Dünnschliffauswertung umfasst fotografische Dokumentation und schriftliche Beschreibung.
2. Das Probenmaterial wird getrocknet, gemahlen und homogenisiert. 500 mg der Probe werden in 25 ml destilliertem Wasser eluiert. Im filtrierten Eluat werden die Anionenkonzentrationen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) mittels Ionenchromatographie (IC), die Kationenkonzentrationen mittels optischer Emissionsspektrometrie mit Anregung im induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES) ermittelt. Sofern erforderlich werden Natrium und Kalium aufgrund der günstigeren Anregungs-bedingungen und der somit niedrigeren Bestimmungsgrenzen mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bestimmt.

Die Salzgehalte werden sowohl als Masseanteil (M-%) als auch unter Berücksichtigung der Atom- und Molekularmassen und der Ladungszahlen als molare Equivalentkonzentrationen (meq/kg) angegeben. Die Verhältnisse der Anionen zu den Kationen können so direkt verglichen und ggf. bestimmten Salzen zugeordnet werden. Außerdem ist über die Anionen-/Kationenbilanz die Vollständigkeit der Analyse hinsichtlich der ermittelten Ionen überprüfbar.

Aussage:

1. Durch die mikroskopische Analyse können Aussagen zu Gesteinskörnung, Verteilung, Porenfüllung, Risse (Verlauf, Häufigkeit und Hauptorientierung) getroffen und zusammenfassend Schadensmerkmale im mikroskopischen Bereich des Gesteinsgefüges festgestellt werden.
2. Standardisierte Salzanalysen lassen Rückschlüsse auf den größten Teil der bauschädlichen Salze, die sich aus den Ionen Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-} und CO_3^{2-} zusammensetzen zu. Das Vorhandensein dieser Salze trägt zum Schadenspotential bei. Kristallisations- und Hydratationsdrücke der bauschädlichen Salze auf Gesteinsoberflächen, aber auch hinter Schalen, führen zur Abspaltung von Gefügebereichen und damit zu einer Reduktion der originalen Gesteinsoberfläche.

6.4 Fallbeispiele

6.4.1 Haus Alst – Nordfassade/Werkstein

(Friederike Funke, Jana Schröder LWL-DLBW)

6.4.1.1 Objektdatenblatt

Objektbezeichnung	Haus Alst, Nordfassade Haupthaus	
Adresse	Alst 1, 48612 Horstmar-Leer Kreis Steinfurt	
Standort Besonderheit	Privatgelände. Zugänglich nach Absprache.	
Klara-ID	123600	

Abb. 30: Ausschnitt Nordfassade

Frühere Maßnahmen	Nach Angaben der Besitzer und Datenlage im Archiv der LWL-DLBW wurden an der Fassade keine Hydrophobierungs- oder Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt.
Zustand	Schalen, Absanden und Abschuppen der Oberflächen, biogener Bewuchs.
Kategorisierung	Keine Hydrophobie, mit Schäden.

Thema	Bearbeitung	Datum
Fotodokumentation	kk, fu	Dez 2018

Abb. 31: *Ausschnitt der Nord-West-Ecke.*

Abb. 32: *Detail der Westfassade mit Bänderung aus Baumberger Kalksandstein.*

Abb. 33*: Ausschnitt des zweiten Fensters von Westen an der Nordfassade im Hauptgeschoss, mit geschädigtem Fenstergewände.*

Abb. 34*: Detail aus Abbildung 4, Schadensbild: Schalenbildung und abschuppende Oberfläche. Bereich Probenentnahme Schale.*

Thema	Bearbeitung	Datum
Recherche: Objektgeschichte	Fu/JaS	Jan 2020

Zusammenfassung der relevanten Informationen zur Objektgeschichte:
„Herrenhaus über trapezförmigem Grundriss in einem nördl. verfüllten Hausteich. Backsteinbau auf hohem gewölbtem Kellergeschoß mit dreigeschossigem Turm an der Südwestecke und achteckigem Treppenturm mit Neurenaissanceportal an der Nordseite. Um 1800 ein ehem. rechtwinkelig anschließender Nordflügel abgebrochen. Farbigkeit durch sog. Specklagen Mauerwerk, Wechsel von horizontalen Back- und Hausteinstreifen zwischen Gesimsen aus Werkstein."
- Quelle: Georg Dehio, Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Nordrhein-Westfalen II, Westfalen. Berlin, München 2011 (Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler). -

Objektakten LWL-DLBW Münster / Archiv der Restaurierungsdokumentation LWL-DLBW:
1624
Grundsteinlegung: datierter Grundstein liegt an der südöstlichen Ecke unterhalb des Wasserspiegels (siehe Vermerk Kaspar 19.2.2008: Vorbericht zur baugeschichtlichen Untersuchung mit Foto von 1935 belegt).

nach 1626
Dachwerk errichtet, anhand von dendrochronologischen Untersuchungen ergeben sich für das Holz des Dachstuhls die Fälljahre 1625 und 1626 (siehe Vermerk Kaspar 19.2.2008: Vorbericht zur baugeschichtlichen Untersuchung).

1724 verm.
Das Giebeldreieck des Westgiebels neu aufgemauert und Einbau der Wappensteine in Zweit-Verwendung (siehe Vermerk Kaspar 12.03.2009: Fassade von Haus Alst, Beobachtungen und Überlegungen).

1935
Entschlammung der Gräfte (siehe Vermerk Kaspar 19.2.2008: Vorbericht zur baugeschichtlichen Überlegung).

1964-65
Geplante Außeninstandsetzungsarbeiten am Herrenhaus.
11.10.1964 Brief vom Eigentümer: Geplante Arbeiten am Haus u.a.: „ausgewitterte Mauerfläche des Hauptgebäudes in der Wasserlinie erneuern" bzw. „Wiederherstellung des Mauerwerks in der Luft-Wasserzone, am Hauptgebäude ausstemmen der Mauerflächen und einmauern neuer Steinmaterialien" „abschlagen des Putzes und Wiederherstellung der Mauerstruktur an der Nordostseite des Hauses (frühere Innenwand)"

29.03.1965
Brief von Architekt Zumbulte, Billerbeck: …"die Wiederherstellung des Mauerwerks in der Luft-Wasserzone, am Hauptgebäude… steht noch aus"…

1967
14.04.1967 Brief vom Eigentümer: Einverständnis gegeben zur bauhistorischen Aufmessung durch Studenten der Technischen Hochschule in Stuttgart, pers. benannt Herr stud. arch. Medenwald aus Nordwalde.

1975
Außenanstrich der Fenster: Bewilligung von Denkmalpflegebeihilfe am 11.08.1975.

1986
Außenwandsanierung der Wasserburg.
20.06.1985 Ortstermin: … *„Schaden an der Hauptburg. Im Bereich des Gräftenspiegels Mauerwerksschäden z.T. Ausbruch. Rißbildung am Eckturm, Nord- und Ostseite starke Verwitterung des Sandsteinmaterials"… „Empfohlen wird u.a. „Instandsetzung des Mauerwerks mit neuer Verputzung; Instandsetzung der Sandsteinteile (erhaltene Maßnahmen)"…*

27.03.1986 Denkmalrechtliche Erlaubnis erteilt für die Außenwandsanierung an der Wasserburg Haus Alst und die Reparaturarbeiten an der Brücke über die Gräfte. Der beigefügte Kostenvoranschlag zur Sanierung beinhaltet keine Arbeiten am Baumberger Kalksandstein. Maßnahme ist eine Reparatur und Neuverputz des Mauerwerks der Fundamentbereiche und entlang der Wasserlinie.

30.09.1986 Ortstermin: Die ausführende Firma wird der Baustelle verwiesen und der Architekt beauftragt eine Nachrückfirma zu finden.

22.12.1986 Abnahmeprotokoll ohne weitere Anmerkungen.

1992
Außenanstrich der Fenster an der Nord- und Ostseite.
24.18.1992 Abnahmeprotokoll ohne weitere Anmerkungen.

1994
30.03.1994 Denkmalrechtliche Erlaubnis zur Erstellung einer Drainage Landseitig am Baudenkmal Haus Alst (Begründung des Eigentümers: es dringt Wasser in den Keller).
24.07.1994 Abnahmeprotokoll ohne weitere Anmerkungen (angefügt sind Kopien von Fotos der freigegrabenen Nordfassade).

2000
22.05.2000 Denkmalrechtliche Erlaubnis zur Renovierung der Fensterumrahmung im 2. Stockwerk des Baudenkmal Haus Alst (Anmerkung des Eigentümers: „Für die gleiche Maßnahme wurde bereits vor einigen Jahren ein Zuschuss bewilligt. Leider konnte aus technischen Gründen damals die Arbeit nicht ausgeführt werden"). Der beigefügte Kostenvoranschlag der Bauunternehmung Josef Hinkers, Horstmar-Leer, sieht vor an 8 Fensterumrahmungen (Mauerwerk) die alten Steine herausnehmen und säubern; die alten Steine wieder einmauern; Mauerwerk mit Billerbecker Kalk, Anneliesekalk neu verfugen.
08.11.2000 Abnahmeprotokoll ohne weitere Anmerkungen.

2002
Fensteranstrich an der Nord- und Südseite.
17.09.2002 Abnahmeprotokoll ohne weitere Anmerkungen.

2009
Intensiver Schriftverkehr: Das Herrenhaus wurde für eine Dachsanierung komplett eingerüstet. Keine Maßnahmen am Mauerwerk der Außenfassaden benannt, mit Ausnahme des Ausbaues der Wappensteine im Westgiebel.
Aktennotizen vom 27.02.2009 und vom 03.03.2009 von Kaspar und Barthold zum Zustand der Steinfassaden: …"*teilweise Besorgnis erregende Zustand der Sandsteine*"… (siehe auch Fotos).

12.03.2009
Vermerk von Dr. Fred Kaspar: Fassade von Haus Alst, Beobachtungen und Überlegungen. . . *„die Geschosse des Gebäudes sind durch umlaufende Gesimse getrennt; während das hohe Sockelgeschoß von Bruchstein mit Werksteingliederung bestimmt wird, sind die beiden Hauptgeschosse und Türme vor den offensichtlich durchgängig aus Backstein aufgemauerten Umfassungswänden mit einer Verkleidung aus einer wechselnden Schichtung aus . . .gelben Baumberger Sandstein und roten Backstein versehen sind…. Die hellen Bänder der Fronten bestehen aus nicht sehr tief in die Wände eingebundenen Sandsteinplatten, die innerhalb des Bandes alle die gleiche Höhe, allerdings unterschiedliche Längen aufweisen. Zudem sind ihre Stöße oft nicht von senkrechten Fugen gebildet, sondern in unterschiedlichen Winkeln auch diagonal geschnitten. . . . Die Sandsteinplatten scheinen bei sehr unterschiedlicher Länge (die meisten Platten haben nur Längen von unter einem Meter, doch sind vereinzelt auch Platten von bis zu 1,8m Länge nachweisbar) durchgängig eine Stärke von etwa 13-15cm aufweisen"* . . .

2011
Entschlammung der Gräfte (siehe statisches Gutachten zum Torhaus 12.06.2015).

Archiv der Restaurierungsdokumentation LWL-DLBW:
Keine Maßnahmen für die Fassade benannt

Dienstnachlass Amtsrestaurator Kurt Schmidt-Thomsen:
Keine Maßnahmen für die Fassade benannt

Bildarchiv LWL-DLBW:
Fotografhien aus den Jahren:
1895 (ohne Nummer, von Schorlemer)
Um 1930 (2 Fotos, ohne Nummer, Werland)
1986 (BA 86/1192)
2000 (BA 00/866), 2008, 2009 (BA 09/11), 2015

Bildarchiv Foto Marburg:
4 Aufnahmen aus den Jahren 2008/2009, Bilddatei-Nr. fmd447474 – fmd447477.

Literatur:
Georg Dehio, Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Nordrhein-Westfalen II, Westfalen. Berlin, München 2011.

6.4.1.2 Zustandskartierung

(Friederike Funke, Wolfram Zalberg, Michael Peren, LWL-DLBW)

6.4.1.3 Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen – Teil 1

(Frank Schlütter, IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Lage der Messpunkte:

M 1: Gebäude-Vorderseite (N), Kartierungsfläche zwischen den östlichen Fenstern, links neben M5 (Testbenzin)

M 2: Gebäude-Vorderseite (N), Kartierungsfläche zwischen den östlichen Fenstern (Wasser)

M 3: Gebäude-Vorderseite (N), Kartierungsfläche zwischen den östlichen Fenstern, zwischen den Fenstern, mittig 2. Steinreihe von unten, wie M4 (Wasser)

M 4: Gebäude-Vorderseite (N), Kartierungsfläche zwischen den östlichen Fenstern, mittig, 2. Steinreihe von unten, weiche, mehlige Oberfläche, keine Flechten (Testbenzin)

M 5: Gebäude-Vorderseite (N), Kartierungsfläche zwischen den östlichen Fenstern, 1,23 m von FBN, Bruchstein angeraut, keine Flechten (Wasser)

Tab. 27: *Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen.*

	M 1	**M 2**	**M 3**	**M 4**	**M 5**
	Testbenzin	**Wasser**	**Wasser**	**Testbenzin**	**Wasser**
Min.	R.∅ 45 mm	R.∅ 45 mm	R.∅ 45 mm	R.∅ 45 mm	R.∅ 45 mm
1	0,70	0,30	0,10	0,15	0,70
2	1,15	0,55	0,20	0,20	1,05
3	1,45	0,75	0,30	0,30	1,30
4	1,65	ausgelaufen	0,40	0,35	1,55
5	1,85		0,50	0,40	1,75
6	2,05		0,55	0,45	1,90
7	2,25		0,60	0,50	2,05
8	2,45		0,65	0,55	2,20
9	2,60		0,75	0,60	2,40
10	2,75		ausgelaufen	0,60	2,50
15	3,55			0,75	3,10
20	4,15			0,90	3,75
25	4,60			1,00	4,25
30	5,00			1,10	4,85
45	6,50				6,40

Interpretation der 30 min. Werte

Bruchsteinmauerwerk, Sockelzone, nicht hydrophobiert:

- 2 Messstellen (Wasser und Benzin, 45 mm Röhrchen)
- M1: 5 ml (Benzin)
  M5: 4,9 ml (Wasser)
  → hohe Wasseraufnahme
  → vergleichbare aufgenommene Mengen von Wasser-und Benzin

Werksteine über der Sockelzone (zwischen den EG-Fenstern, nicht hydrophobiert):

- 3 Messstellen (Wasser und Benzin, 45 mm Röhrchen)
- M4: 1,1 ml (Benzin)
  M6: 3,0 ml (Wasser)
  M7: 1,6 ml (Wasser)
  → starke Schwankungsbreite
  → unspezifische Werte (mögliche Ursache: unregelmäßiger biogener Bewuchs)

- **Zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine wirksame Hydrophobierung nachweisbar**
- **Starke Schwankungen in den Messwerten durch ungleichmäßigen biogenen Bewuchs und Verschmutzungen**
- **Überwiegend deutlich höhere Aufnahme von Benzin gegenüber Wasser**

Fazit: An keiner der Messstellen konnte zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine wirksame Hydrophobierung nachgewiesen werden. Die starken Schwankungen in den Messwerten werden durch ungleichmäßigen biogenen Bewuchs und Verschmutzungen hervorgerufen. Es ist überwiegend eine deutlich höhere Aufnahme von Benzin gegenüber Wasser feststellbar. Auch am Haus Alst bestätigen sich die Aussagen vom Torhaus (Haus Stapel) und vom Schloss Münster, dass höhere Aufnahmewerte für Benzin ein Indikator für wasserabweisende Oberflächenbeläge sind.

6.4.1.4 Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen – Teil 2

(Jeannine Meinhardt, FH Potsdam)

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen **FH;P**		
Objekt: Haus Alst	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 8**
Adresse: Alst 1, 48612 Horstmar	**Lokalisierung:** Mauerwerk links	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus: unbehandelt	
Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten **w-Wert =** 4,0 kg/m²√t		
Beschreibung der Oberfläche: Leicht verwittert, aber stabil, gelblich, gemessen mit der Schichtung		

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen **FH;P**		
Objekt: Haus Alst	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 12**
Adresse: Alst 1, 48612 Horstmar	**Lokalisierung:** Mauerwerk rechts	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus: unbehandelt	
Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten **w-Wert =** 8,9 kg/m²√t		
Beschreibung der Oberfläche: Gelblich, senkrecht zur Schichtung, leicht zurückgewittert aber stabil		

6.4.1.5 Bohrwiderstandsmessung

(Gerhard D´ham, Dorothée Schraeder, HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen)

Zum Objekt:	um 1626 erbaut, Sockel ehemals verputzt
Frühere Maßnahmen:	laut Akten und Eigentümerangaben keine Konservierungsmaßnahmen an Werksteinen, nicht hydrophobiert
Lage der Messstellen:	Nordfassade, zwischen 1. und 2. Fensterachse von Osten
Zustand Messstellen:	geringfügige Abwitterung (Scharrur noch zu erkennen), ganz geringes Abmehlen, Messstellen 1 und 5 Abmehlen bis Abschuppen

***Abb. 35**: Lage der Messstellen an der Fassade.*

***Abb. 36:** Übersicht zu Messstellen 1 bis 5.*

Abb. 37: Messstelle 1-5

***Diagr. 24:** Bohrwiderstandsprofile der Messungen 1 bis 5 (Bohrschneidenabrieb korrigiert)*

Messergebnisse HrFA 1 bis 5	HrFA 1: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 4,5 N, Variationskoeffizient 12 % HrFA 2: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 5,9 N, Variationskoeffizient 10 % HrFA 3: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 6,1 N, Variationskoeffizient 12 % HrFA 5: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 4,2 N, Variationskoeffizient 10 % recht gleichmäßige Profilverläufe ohne anfängliche Schwächezone; gute Übereinstimmung von phänomenologischem Zustandsbefund und Bohrwiderstandskurven
Interpretation HrFA 1 bis 5	Die Messstellen zeigen einen guten Zustand der Werksteine. Es ist kein Konservierungsbedarf zu erkennen.

6.4.1.6 Probenentnahme

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Die Proben werden für den Tropfenaufsetzmethode und die mikroskopische Gefügeanalyse entnommen.

Abb. 38: Entnommene Proben für Tropfenaufsetzmethode und Gefügeanalyse

Tab. 28: *Übersicht über die entnommenen Materialproben.*

Bez.	Beschreibung / Entnahmestelle	Aufgabenstellung / Fragen
BKS-Schalen von der N-Fassade		
HA_M 1	BKS-Schale Nordfassade, mittleres Steinfeld, Ecke Fensterbeule	• Prüfung auf Hydrophobie • Mikroskopie (DS)
HA_M 2	BKS-Schale Nordfassade, östliches Steinfeld, drittes Steinband	• Prüfung auf Hydrophobie • Mikroskopie (DS)

6.4.1.7 Tropfenaufsetzmethode

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Tab. 29: *Bewertung des Tropfenaufsetzmethode*

Probe	Beschreibung	Prüfung auf Hydrophobierung
HA_M 1	BKS-Schale Nordfassade, mittleres Steinfeld, Ecke Fensterbeule	• Putzreste an der Oberfläche • Oberfläche, Rückseite und Bruchfläche des Natursteins rasch saugend • Anhaftende Putzreste sehr langsam saugend **Bewertung:** ⇒ keine Hinweise auf Hydrophobierung
HA_M 2	BKS-Schale Nordfassade, östliches Steinfeld, drittes Steinband	• Oberfläche, Rückseite und Bruchfläche des Natursteins rasch saugend • Eine wasserabweisende Stelle am Querbruch (Singularität) **Bewertung:** ⇒ keine eindeutigen Hinweise auf Hydrophobierung

Bewertung:

Die Untersuchungen mit aufgesetzten Wassertropfen mit einer feinen Kanüle einer Injektionsspritze an den kleinen Schalenbruchstücken, die an der Fassade entnommen werden konnten, lieferten keine Hinweise auf eine Hydrophobierung.

6.4.1.8 Mikroskopische Gefügeanalyse

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Tab. 30: *Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Nordfassade Haus Alst.*

Probe	Beschreibung	Untersuchungsergebnisse
HA_M 1	BKS-Schale Nordfassade, mittleres Steinfeld, Ecke Fensterbeule	• BKS mit Mikrobiologie an der Oberfläche (Pilze und Algen → Flechten) • Flechten etwa 1mm stark • Evtl. Gips in den Flechten (→ REM/EDX) • sehr vereinzelt Gesteinspartikel in den Flechten • BKS: stark geschädigt (oberflächenparallele Risse → Schalen-/Schuppenbildung)
HA_M 2	BKS-Schale Nordfassade, östliches Steinfeld, drittes Steinband	• BKS mit Schlämme-/Putzresten an der Oberfläche • Stärke der Putzreste 0,5 mm • Nicht aus dem BKS stammende silikatische Mineralkörner und Gesteinsbruchstücke in der Schlämme (0,2 bis 0,3 mm) • BM vollständig vergips (→ REM/EDX)

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1418_001

Abb. 39: *Aufgefächerte BKS-Schale mit Flechten*

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1418_002

Abb. 40: *Aufgefächerte BKS-Schale mit Flechten*

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1418_005

Abb. 41: *Details aus* ***Abb. 39*** *Flechten: Pilze und Algen*

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1418_006

Abb. 42: *Gleiche Probestelle wie Abb.* ***41*** *Flechten: Pilze und Algen unter gekreuzten Polarisatoren.*

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1418_007

Abb. 43: *Kontaktbereich Flechten/BKS. Zahlreiche Risse. Kein Gips.*

Probe **HA_M1**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1418_008

Abb. 44: *Gleiche Probenstelle wie Abb.* ***43*** *unter gekreuzten Polarisatoren Kontaktbereich Flechten / BKS. Zahlreiche Risse. Kein Gips*

Probe **HA_M2**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1419_001

Abb. 45: *BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche.*

Probe **HA_M2**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1419_004

Abb. 46: *Detail aus Abb.* ***45*** *BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche.*

Probe **HA_M2**

Beleuchtung: Polarisation;

Bildnummer: 19M1419_005

Abb. 47: *Gleiche Probenstelle wie Abb.* ***46*** *unter gekreuzten Polarisatoren BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche.*

6.4.2 Haus Stapel – Kreuzigungsgruppe/Skulptur

(Friederike Funke, Jana Schröder, LWL-DLBW)

6.4.2.1 Objektdatenblatt

Objektbezeichnung	Haus Stapel, Kreuzigungsgruppe	
Teilfläche zur Untersuchung	Rückseite Sockel und Figuren bis 3m Höhe	
Adresse	Gennerich 18, 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld	
Standort Besonderheit	Privatgelände. Zugänglich nach Absprache.	
Klara-ID	17459	

Abb. 48: Rückansicht

Frühere Maßnahmen	Letzte Restaurierungsmaßnahme 1968 mit dokumentierter Hydrophobierung.
Zustand	Risse, Schalen einlagig und mehrlagig, Abschuppen, Flechten und Moose, Schwarze Auflagen,
Kategorisierung	Hydrophobie mit Schäden.
Aktueller Status	Es besteht Handlungsbedarf.

Thema	Bearbeitung	Datum
Fotodokumentation	Zal, fu	März 2019

Abb. 49: *Detail der Figur „Maria" links vom Kreuz, Schadensbild: Fehlstelle im unteren Gewandabschluss*

Abb. 50: *Detail der Sockelrückseite, Schadensbild: strukturell stark entfestigter Stein.*

Abb. 51: *Detail der Figur „Maria", links vom Kreuz, Schadensbild: Fehlstelle im Gewand.*

Thema	Bearbeitung	Datum
Fotodokumentation	Zal, fu	März 2019

Abb. 52: *Ausschnitt der Sockelrückseite mit deutlicher Schalenbildung.*

Abb. 53: *Sockelrückseite mit Mürbzone unter Schalen.*

Abb. 54: *Detail Sockelrückseite mit Schalenbildung.*

Thema	Bearbeitung	Datum
Restaurierungsgeschichte	Fu, JaS	Aug 2019

Zusammenfassung der relevanten Informationen zur Objektgeschichte:

„Schon 1211 genannte Wasserburg. - Vorburg und Herrenhaus auf einer großen Insel, über Allee, Brücke und Torhaus erschlossen; Baumberger Quader. Das breit gelagerte klassizistische Herrenhaus 1819-27 nach Plänen des Architekten August Reinking († 1819) durch Tiroler Bauleute errichtet, Bauführer Aloys Kirschner. [...] An der Allee steinerne Kreuzigungsgruppe von 1756, der Werkstatt von Cornelius Sasse zugeschrieben."

- Quelle: Georg Dehio: Nordrhein-Westfalen II. Westfalen. Hrsg. in Zusammenarbeit mit der LWL-Denkmalpflege u. a. München/Berlin 2011 (Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler). -

Objektakten LWL-DLBW Münster / Archiv der Restaurierungsdokumentation LWL-DLBW:

1756
Skulpturengruppe aufgestellt.

1900
Skulpturengruppe an den jetzigen Platz versetzt (siehe auch Vermerk 1993).

1928/29
Restaurierung der Kreuzigungsgruppe: . . ."Es wurden alle kranken Stellen entfernt, die Gruppe im übrigen aber unverändert gelassen und nur mit Fluat behandelt" . . .
Die Kreuzbalken wurden komplett erneuert.

1968/69
Sturmschäden vom 3.8.1968: . . ."eine große Kastanie ist auf die Kreuzigungsgruppe gefallen . . . der Christus und der Johannes sind mit den Kreuzbalken auseinander gebrochen" . . .

Renovierungsarbeiten an der Kreuzigungsgruppe durch die Fa. Fark, Havixbeck: Kreuzstange neu herstellen, vorhandene Kreuzstange und Querbalken überarbeiten, Christus und Figur aufstellen und befestigen.

Restaurierung der Figuren der Kreuzigungsgruppe durch Eberhard Worch, Restaurator, Münster:
„Mechanische Reinigung. Befestigen der abgebrochenen Figurenteile mittels Kupferdübel und Akemi. Ergänzen sämtlicher frischer Stoßschäden mit Mineros und – soweit nötig – Kupferarmierung. Im Übrigen Teilergänzung: am Corpus weitgehende Ergänzung, die stark angewitterte rechte Seite von oben bis unten, Hände, Wadenflächen; an den Assistenzfiguren zurückhaltenderes Wiederherstellen. Das Gesicht Christi ist nach der konservierenden Festigung und Mineros-Kompakata-Vorschlämme aufgetragen worden. Am Sockel Ergänzungen von Profilausbrüchen. Neuverfugung mit hydraulischem Kalkmörtel. In der Schrifttafel wurden fehlende Buchstaben in der gleichen Art wie am Gesicht Christi mit Mineros ergänzt, sofern sie sich aus dem Sinn eindeutig rekonstruieren ließen. Zweimalige, stellenweise dreimalige Tränkung mit Sandsteinverfestiger der Goldschmidt AG. Außerdem Silikonisierung mit Sikovin. Festlegen der Schalen mit Akrylharzlösung vom Typ Paraloid B72, stellenweise mit Akemi. Schließen der Risse teils mit Mineros, teils mit Kieselester- Steinmehlkitt.

Farbliches Einpassen unruhiger Stellen. Ausführungen der Arbeiten an Christus und Johannes in der Werkstatt, an Maria und Sockel am Ort. Kreuzstamm nach Wiederherstellung durch Fa. Fark, Havixbeck, ebenfalls silikonisiert."
1993
Vermerk von Strohmann Referat Restaurierung LWL-DLBW zur Kreuzigungsgruppe an der Zufahrtsallee bzgl. anstehende Restaurierungsmaßnahmen

Dienstnachlass Amtsrestaurator Kurt Schmidt-Thomsen:
1968, Worch: Tegovakon 3:1, 2-3x, Acrylharz, Sikovin.

Bildarchiv LWL-DLBW:
Fotografien aus den Jahren:
1928 (171/4, 171/3, zwei Bilder ohne Inventarnummer), 1929, 2006, 2019

6.4.2.2 Zustandskartierung

(Friederike Funke, Michael Peren, Wolfram Zalberg, LWL-DLBW)

4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen

6.4.2.3 Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen

(Jeannine Meinhardt; FH Potsdam)

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen **FH;P**		
Objekt: Kreuzigungsgruppe, Haus Havixbeck	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 1**
Adresse: Josef-Heydt-Straße 1, 48329 Havixbeck	**Lokalisierung:** Kreuzigungsgruppe, rechte Figur, Rückseite, Lendenwirbelbereich, mittig	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus Objekt allgemein: behandelt, hydrophobiert	
Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten **w-Wert** = 1,6 kg/m²√t		
Beschreibung der Oberfläche: Stabil, leicht verschwärzt		

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen

FH;P

Objekt: Kreuzigungsgruppe, Haus Havixbeck	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 2**
Adresse: Josef-Heydt-Straße 1, 48329 Havixbeck	**Lokalisierung:** Rechte Figur, Rückseite, ca. Kniehöhe, rechter Gewandrand **Konservierungsstatus Objekt allgemein:** behandelt, hydrophobiert	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019

Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten
w-Wert = 1,5 kg/m²√t

Beschreibung der Oberfläche:

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen

FH;P

Objekt: Kreuzigungsgruppe, Haus Havixbeck	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 3**
Adresse: Josef-Heydt-Straße 1, 48329 Havixbeck	**Lokalisierung:** Kreuzigungsgruppe, Rückseite Sockel, oben rechte Ecke	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus Objekt allgemein: behandelt, hydrophobiert	

Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten
w-Wert = 0,12 kg/m²√t

Beschreibung der Oberfläche:
Stabil, biogener Bewuchs

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen

FH;P

Objekt: Kreuzigungsgruppe, Haus Havixbeck	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 4**
Adresse: Josef-Heydt-Straße 1, 48329 Havixbeck	**Lokalisierung:** Kreuzigungsgruppe, ausgewechselter Teil des Kreuzes, linke Seite	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus Objekt allgemein: behandelt, hydrophobiert	

Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten
w-Wert = 4,5 kg/m²√t

Beschreibung der Oberfläche:
Scharrur ohne starke Verschwärzung

DBU-Forschungsvorhaben: Baumberger Kalksandstein - Umgang mit Althydrophobierungen

FH;P

Objekt: Kreuzigungsgruppe, Haus Havixbeck	**Bearbeiter*innen:** Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein	**Blatt: 5**
Adresse: Josef-Heydt-Straße 1, 48329 Havixbeck	**Lokalisierung:** Kreuzigungsgruppe, Vorderseite Kreuz, linke Seite (von vorn) 40 cm über dem Sockel, ausgewechselter Teil	**Bearbeitungszeitraum:** Mai 2019
	Konservierungsstatus Objekt allgemein: behandelt, hydrophobiert	

Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten
w-Wert = 4,1 kg/m^2√t

Beschreibung der Oberfläche:
Auf verschwärztem Bereich mit Scharrur

6.4.2.4 Probenentnahme

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Die Proben werden für den Tropfenaufsetzmethode und die mikroskopische Gefügeanalyse (vgl. Kapitel **6.4.2.7**) entnommen.

Abb. 55: *Entnommene Proben für Tropfenaufsetzmethode und Messung der US-Geschwindigkeit.*

Tab. 31: *Übersicht über die entnommenen Materialproben.*

Probe	Beschreibung / Entnahmestelle	Aufgabenstellung / Fragen
Kreuzigungsgruppe		
Hx_M 1	Dünne Schale (1-2 mm), Sockelbereich	• Prüfung auf Hydrophobie
Hx_BK 1	BKS-Bohrkern (∅ 23 mm), festes Gestein	• US-Geschwindigkeit

6.4.2.5 Tropfenaufsetzmethode

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Tab. 32: *Bewertung des Tropfenaufsetztmethode*

Probe	Beschreibung	Prüfung auf Hydrophobierung
Hx_M 1	Dünne Schale (1-2 mm) Haus Stapel, Kreuzigungsgruppe, Rückseite, Sockelbereich	• Rückgewitterte, verschwärzte Oberfläche: langsam saugend • Rückseite: wasserabweisend (flache bis kugelförmige Tropfen) • Bruchfläche: wasserabweisend (kugelförmige Tropfen) Bewertung: ⇒ Hydrophobierung eindeutig nachweisbar

6.4.2.6 Bohrwiderstandsmessung

(Gerhard D´ham, Dorothée Schraeder; HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen)

Zum Objekt:	1756 errichtete Kreuzigungsgruppe, 1900 an jetzigen Standort versetzt
Frühere Maßnahmen:	1928 mit Fluat behandelt und Kreuzbalken erneuert; letztmalig 1968 restauriert, dabei mehrfache Tränkung mit KSE (wo?), bündige Verfugung mit hydraulischem Kalkmörtel und Hydrophobierung
Lage der Messstellen:	Rückseite des aus mehreren Werksteinschichten aufgebauten Podestes
Bestand:	ursprüngliche Oberflächengestaltung an BKS-Werksteinen nicht erkennbar
Zustand:	Messstelle 1-3: auf großflächiger, verschwärzter Schale, Oberfläche (OF) fest Messstelle 4: am Rand der verschwärzten Schale, OF fest Messstelle 5: auf erodierter Fläche nach Schalenverlust, OF fest Messstelle 6: verschwärzt, OF fest Messstelle 8-9: am Rand großflächiger Schalen, Flechtenbewuchs Messstelle 10-11: Erosion infolge Schalenverlust, OF fest (Austauschquader) Messstelle 12-13: starke Erosion, Mehrfachschuppen

Abb. 56: *oben links; Messstellen am Sockel, oben rechts; Messstellen 1-5, unten links; Messstelle 6,8 und 9, unten rechts; Messstellen 10,11,12 und 13.*

Diagr. 25: *Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 1 bis 5 (Bohrschneidenabrieb korrigiert).*

Ergebnisse HxKG 1 bis 5	HxKG 1: Abschnitt 1-25,3 mm: Mittelwert 8,7 N, Variationskoeffizient 36 % HxKG 2: Abschnitt 1-25,5 mm: Mittelwert 8,7 N, Variationskoeffizient 31 % HxKG 3: Abschnitt 1-25,6 mm: Mittelwert 7,9 N, Variationskoeffizient 35 % HxKG 4: Abschnitt 1-25,6 mm: Mittelwert 10,1 N, Variationskoeffizient 29 % HxKG 5: Abschnitt 1-25,6 mm: Mittelwert 8,0 N, Variationskoeffizient 11 % Bei weitgehender Übereinstimmung zeigen die Bohrwiderstandprofile 1 bis 3 zweigipflige Maxima im Tiefenabschnitt 1 bis 4 mm, gefolgt von einem Minimum bei 5 mm Tiefe sowie nachfolgend ein gleichbleibendes Bohrhärteniveau um 8 N. Bohrung 4 am Rande der großflächigen Schale zeigt einen ähnlichen, allerdings räumlich gedrängteren Profilverlauf mit noch höheren Werten. Bohrung 5 im Bereich der bereits abgefallenen Schale weist nur geringfügige Schwankungen über die Profiltiefe auf.
Interpretation HxKG 1 bis 5	Der Profilverlauf der Messungen 1 bis 4 ist als typisches Mehrfachschalen-profil anzusprechen. Die deutlich erhöhten Bohrwiderstandswerte in den ersten 5 mm dürften Folge früherer Anwendungen von Kieselsäureester mit geringer Eindringtiefe sein. Die Minima in 5 mm Tiefe sind als Mürbezonen anzusprechen im Übergang der harten Schale in Oberflächennähe zum ursprünglichen Grundniveau der Bohrhärte an diesem Werkstein.

Diagr. 26: *Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 6 und 9 (Bohrschneidenabrieb korrigiert)*

Ergebnisse HxKG 6 und 9	HxKG 6: Abschnitt 1-25,7 mm: Mittelwert 6,0 N, Variationskoeffizient 20 % HxKG 9: Abschnitt 1-25,1 mm: Mittelwert 6,0 N, Variationskoeffizient 14 % Beide Profile zeigen oberflächennah ein Maximum mit verdoppeltem Bohrwiderstand bei sehr geringer Tiefenerstreckung und ab etwa 4 mm Tiefe ein gleichbleibendes Niveau mit geringen Schwankungen. Bei Messung 9 tritt im Übergang von harter Außenzone zum Normalniveau ein Minimum in 3 mm Tiefe auf. Hier sinkt die Bohrhärte auf ein Drittel des Normalniveaus.
Interpretation HxKG 6 und 9	Die Maxima dürften Folge früherer Anwendungen von Kieselsäureester mit geringer Eindringtiefe sein. Die Messung 9 ist als Schalenprofil mit Mürbzone anzusprechen.

Diagr. 27: *Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 10 bis 13 (Bohrschneidenabrieb korrigiert)*

Ergebnisse HxKG 10 bis 13	HxKG 10: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 11,6 N, Variationskoeffizient 18 % HxKG 11: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 12,6 N, Variationskoeffizient 15 % HxKG 13: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 4,5 N, Variationskoeffizient 43 % Messungen 10 und 11 an einem Austauschquader von 1928 weisen ein hohes Bohrwiderstandsniveau bei guter Übereinstimmung im Profilverlauf auf. Bis in 6 bzw. 8 mm Tiefe liegen geringere Werte vor. Messung 13 zeigt bis in 4,5 mm Tiefe bei deutlichen Schwankungen niedrigste Bohrwiderstandswerte von durchschnittlich 0,8 N, die fast übergangslos ab 5 mm Bohrtiefe auf ein Niveau von durchschnittlich 5,4 N springen.
Interpretation HxKG 13	Die Bohrwiderstandsmessung 13 zeigt ein Auflockerungsprofil mit abrupter Stufenausprägung. Einer Zone Blätterteig artiger Gefügezerrüttung folgt ab 5 mm Tiefe praktisch übergangslos der nicht geschädigte Kern.

6.4.2.7 Mikroskopische Gefügeanalyse

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

***Tab. 33**: Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Kreuzigungsgruppe Havixbeck*

Probe	Beschreibung	Prüfung auf Hydrophobierung
Hx_BK 1	BKS-Bohrkern (∅ 23 mm) Kreuzigungsgruppe	• Untersuchungsbereich: von der Oberfläche bis in 3 cm Tiefe • stellenweise Risse in Oberflächennähe (bis in 1 mm Tiefe) unterhalb des Schadenshorizontes intaktes Gefüge

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

***Abb. 57:** Gefüge des Steins mit Oberfläche zwischen den Bohrkanälen. Stellweise Risse (Ellip.markierung). Die Pfeile markieren die Bohrkanäle. Übersicht.*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

***Abb. 58:** Detail aus Abb. **57** Oberflächenparallele Risse im Randbereich zum Bohrkanal*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Abb. 59: *Detail aus* ***Abb. 58*** *Oberflächenparallele Risse an der Kante zum Bohrkanal.*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Abb. 60: *Intaktes Gefüge des Steins am Ende des Bohrkanals. Übersicht.*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Abb. 61: *Detail aus* ***Abb. 60*** *Intaktes Gefüge des Steins am Ende des Bohrkanals.*

Abb. 62: *Detail aus Abb.* ***61*** *Intaktes Gefüge des Steins am Ende des Bohrkanal.*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel+ Lamda Pl.

Abb. 63: *Detail aus Abb.* ***62*** *Intaktes Gefüge des Steins am Ende des Bohrkanals.*

Probe **Hx BK1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel+ Lamda Pl.

6.4.2.8 Analyse der Elementverteilung in einer Steinprobe aus Baumberger Kalksandstein von der Johannes Evangelist-Figur der Kreuzigungsgruppe in Havixbeck, Haus Stapel mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX).

(Peter Kozub, Anne Sicken; CICS Köln)

Einführung

Die Betrachtung eines Materials mittels eines Lichtmikroskops kann oft nicht ausreichend sein, um es genau zu beschreiben. Im Vergleich zur Lichtmikroskopie ermöglicht die REM-Analyse eine weitaus höhere Auflösung bis in den nm-Bereich. Dadurch können selbst sehr kleine Strukturen der Materialprobe erfasst werden. Während der Analyse tastet ein Elektronenstrahl, der sehr präzise fokussiert ist, die Oberfläche der Probe ab, wobei die abgestrahlte Energie von Detektoren erfasst und in Bildwerte umgewandelt wird.

Durch die Kombination mit der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) kann während der Untersuchung auch die Elementzusammensetzung sehr kleiner Bereiche der Probe bestimmt werden. Die Analyse kann punktuell an Materialproben oder auf einer größeren Fläche (EDX-Element-Mapping) durchgeführt werden. Dabei werden die chemischen Elemente in einer Probe anhand der charakteristischen Röntgenstrahlen identifiziert, die die Atome aussenden, wenn sie mit Elektronen angeregt werden.

Das Institut für Konservierungs- und Restaurierungswissenschaften (CICS) der Technischen Hochschule Köln verfügt über zwei Rasterelektronenmikroskope (ZEISS SIGMA VP und ZEISS EVO LS10), die eine solche Untersuchung ermöglichen. Die Feldemissionskathode der SIGMA VP liefert dabei Bilder von besonders hoher Qualität.

Objektvorstellung und -geschichte

Die Kreuzigungsgruppe, die aus Christus am Kreuz, Maria und Johannes dem Evangelisten[20] besteht und aus Baumberger Kalksandstein gefertigt wurde (Objektkürzel: HS-c), wird der Werkstatt von Cornelius Sasse zugeschrieben. Nach Recherchen der LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen wurde sie erstmals im Jahr 1756 aufgestellt und im Jahr 1900 an ihren heutigen Standort an der Allee zum Wasserschloss Haus Stapel verlegt (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). I m Zeitraum von 1928 bis 1929 wurden die ersten dokumentierten Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt, bei denen einige "kranke Stellen" beseitigt und eine "Fluat"-Behandlung[21] durchgeführt wurde. Allerdings wurde bei einem Sturm am 3. August 1968 erheblicher Schaden verursacht, als ein Kastanienbaum auf die Kreuzigungsgruppe fiel. Unmittelbar danach führte der Restaurator Eberhard

[20] Frühere Dokumente haben irrtümlicherweise diese Figur als Maria Magdalena bezeichnet.

[21] Fluate" ist eine Abkürzung für Fluorsilikate, welche Salze der Hexafluoridokieselsäure (Fluoridosilicate) mit der allgemeinen Formel $M^{+}{}_{2}[SiF_6]$ bzw. $M^{2+}[SiF_6]$ oder $M^{3+}{}_{2}[SiF_6]_3$ darstellen. Dabei steht M für Metalle Bautenschutzes wurden vor allem Magnesium-, Aluminium-, Blei- und Zinkfluate verwendet, wie in FARRAK 1999, S. 36f beschrieben. Es ist jedoch nicht bekannt, welche Fluate bei der Kreuzigungsgruppe eingesetzt wurden. Ebenso ist ungewiss, ob eine Vorbehandlung mit einer sogenannten Avantfluat (Wasserglaslösung) stattgefunden hat.

Worch aus Münster eine Restaurierung durch, die unter anderem eine "stellenweise dreimalige Tränkung mit Sandsteinfestiger der Goldschmidt AG"22 und eine "Silikonisierung mit Sikovin23" umfasste24.

Abb. 64: *Kreuzigungsgruppe an der Allee zum Wasserschloss Haus Stapel, Havixbeck. Die rote Umrahmung markiert den Bereich mit dem abgefallenen Gewandstück.*

Fragestellung und Zielsetzung

Die Behandlungstiefe ist eine entscheidende Fragestellung im Zusammenhang mit der Hydrophobierung von Steinobjekten, unabhängig von den eingesetzten Hydrophobierungsmitteln. Die erreichte Tiefe der Hydrophobierung bestimmt maßgeblich die Art und Intensität der Oberflächenverwitterung von Steinobjekten.

Die Wahl der Methode für diese Studie und ihre Gültigkeit basieren auf mehreren Annahmen. Erstens wird angenommen, dass die verwendeten Hydrophobierungsmittel im behandelten Bereich verbleiben. Zweitens wird angenommen, dass sich wasserlösliche Schadstoffe wie Salze hinter der hydrophoben Zone angesammelt haben. Da flüssiges Wasser in porösen Strukturen im Bereich der hydrophoben Schicht nur in Form von Dampf aus dem Inneren der Struktur entweichen kann, kommt es unterhalb dieser Schicht zu einer Anreicherung von wasserlöslichen Substanzen. Dieses Phänomen tritt vor allem bei geringen Hydrophobierungstiefen auf. Gleichzeitig ist in diesen Zonen mit einer Verringerung der gesteinsspezifischen Bestandteile zu rechnen, als Folge der Entfestigung dieser Bereiche.

Es wird erwartet, dass diese Studie Einblicke in die erzielten Eindringtiefen von Hydrophobierungen gibt. Gleichzeitig hofft man, dass die punktuelle Analyse der Elemente in den Bereichen hinter der hydrophoben Zone Informationen über die Art der möglicherweise vorhandenen Salze erwarten. Die Verteilung der Elemente auf einer größeren Fläche, die durch EDX-Elementkartierung (EDX-Element-Mapping) sichtbar gemacht wird, sollte Aufschluss über die Verteilung der Salze in der Steinstruktur geben.

[22] Es ist unklar, um welches Festigungsmittel es sich handelt. Zu der Zeit bot die Firma Goldschmidt AG verschiedene Produkte unter dem Namen "Sandsteinfestiger" an, darunter eine Produktgruppe namens Tegovakon, wie z.B. Tegovakon V (Orthosilikat, Ethylpolysilikat) und Tegovakon T (Orthosilikat, Methylsiloxan).

[23] Das hierbei verwendete Mittel ist ein auf Silikonharz basierendes Hydrophobierungsmittel, welches von der Firma Goldschmidt AG hergestellt wird. Eine diesbezügliche Angabe findet sich in der IFS DATENBANK von 2017. Allerdings besteht Unklarheit darüber, ob es sich bei diesem Produkt um ein Alkoxysilan, ein Alkoxysiloxan oder eine Mischung aus beiden handelt.,

Im Falle der Verwendung von Fluaten in den Jahren 1928/29 ist zwar nicht bekannt, um welche Art von Fluaten es sich handelt, es ist jedoch zu erwarten, dass zumindest Fluor-Ionen nachweisbar sind. Wenn eine Vorbehandlung mit Avantfluat stattgefunden hat, müssten auch Na- oder K-Ionen nachweisbar sein.[25]

Da sowohl die Alkoxysiloxane als auch das 1968 für die Kreuzigungsgruppe verwendete Hydrophobierungsmittel die gleichen Elemente enthalten wie auch der Baumberger Kalksandstein, ist ein direkter Nachweis der Behandlungstiefe mit dieser Methode nicht möglich. Es wird davon ausgegangen, dass die Untersuchung der REM-Bilder aufgrund der langen Verwitterungszeit des Objektes keine eindeutigen Hinweise für das Vorhandensein dieser Stoffe in der Steinstruktur liefern wird, wie dies bei frisch durchgeführten Behandlungen mit ähnlichen Substanzen der Fall ist. (MASCHA, 2021; BOMMES, 2022). Daher bleibt nur der oben beschriebene indirekte Ansatz, indem die Anreicherung von Schadstoffen und die Verringerung von Gesteinsbestandteilen in Bereichen hinter der hydrophoben Zone ermittelt werden. Dabei geht man von den üblichen bauschädlichen Salzen aus und sucht gezielt nach Mg-, Na-, K-, Ca-, SO_4-, CO_3-, NO_3-, und Cl-Ionen. (NÄGELE,1992)

Versuchsaufbau und Untersuchungsmethode

Am 09.07.2021 wurde bei einem Termin vor Ort bei der Kreuzigungsgruppe festgestellt, dass ein großes Fragment einer Gewandfalte von der Johannes-Figur abgefallen ist (s. **Abb. 64,** rote Umrandung **und Abb. 65** links,). Das abgefallene Gewandfragment bot eine Möglichkeit einer Probeentnahme für die Ermittlung des Tiefenprofils an, wobei darauf geachtet wurde, die Originaloberfläche möglichst wenig zu zerstören.

Abb. 65: *Abgefallenes Gewandfragment der Johannes-Figur. Ansicht der Bruchfläche. Die rote Umrahmung markieren die Probenentnahmestellen. Rechts: in Kunstharz eingebettete Proben P1 und P2.*

Zwei kleine Stücke wurden vorsichtig mit einem Dremel aus dem Gewandfragment herausgeschnitten, wobei die Oberfläche miterfasst, aber gleichzeitig möglichst wenig beansprucht wurde. Die herausgeschnittenen Stücke wurden rechtwinklig zur Oberfläche angeordnet und gingen fast nahtlos ineinander über. Sie reichten von der Gesteinsoberfläche bis ca. 1 cm in die Tiefe des Steins hinein und wurden in einem Kunstharz eingebettet. Anschließend wurden sie entlang der Proben quer zur

[25] Als ´Avantfluat´ für die Vorbehandlung kommen in der damaligen Zeit lediglich Natrium- oder Kaliumwassergläser in Frage.

Oberfläche des Gewandfragments feingeschliffen (siehe , rechts). Die Querschliffe wurden unter dem Polarisationsmikroskop begutachtet und in zwei Abschnitten fotografisch dokumentiert (siehe **Abb. 66**).

Abb. 66: *Mikroskopische Aufnahmen der Querschliffe der Proben P1 (oben) und P2 (unten).*

Danach wurden REM-Aufnahmen (**Abb. 67**) und EDX-Analysen an den beiden Rasterelektronenmikroskopen (ZEISS SIGMA VP und ZEISS EVO LS10) am Institut für Konservierungs- und Restaurierungswissenschaften (CICS) der Technischen Hochschule Köln durchgeführt.

Untersuchungsergebnisse

Bei der EDX-Analyse wird eine Probe durch einen Elektronenstrahl zur Aussendung von charakteristischer Röntgenstrahlung angeregt. Mit Hilfe eines EDX-Detektors können die Röntgenimpulse der vorliegenden Elemente aufgenommen und nach ihrer Energie sortiert werden. So ist es daher möglich, auf die in der Probe enthaltenen chemischen Elemente zu schließen. Die Intensitäten der emittierten Strahlung können zur Quantifizierung der chemischen Elemente in der Probe verwendet werden. Somit kann EDX-Analyse zur räumlichen, quantitativen chemischen Analyse unbekannter Proben verwendet werden.

Die REM-Bilder von Querschnitten der Proben P1 und P2 (siehe **Abb. 67**) zeigen einige deutlich sichtbare fossile Überreste.

Abb. 67: *REM- Aufnahmen der Proben P1 (erste und zweite Reihe von oben) und P2 (dritte und vierte Reihe von oben). Oben rechts ein Ausschnitt des Bildes drunter (Probe P1), deutlich sichtbare fossile Überreste. Unten links ein Ausschnitt des Bildes drüber (Probe P2), am Rand der Probe rundliche, geklammerte Struktur einer Foraminifere.*

Allerdings liefert erst die EDX-Analyse und insbesondere das ortsaufgelöste Element-Mapping aussagekräftige Ergebnisse. Hierbei wurden ausgewählte äußerste Abschnitte der Proben P1 und P2 untersucht, die durch eine gelb markierte Umrandung auf den **Abb. 68** und **Abb. 70** (sowie auf **Abb. 67,** links in der zweiten und dritten Reihe von oben) gekennzeichnet sind. Zusätzlich wurden diese Abschnitte ortsaufgelöst gescannt, wie in **Abb. 69** und **Abb. 71** dargestellt.

Probe P1 (Oberflächenbereich, Tiefenprofil)

***Abb. 68**: REM-Aufnahme der Probe P1. Die gelbe Umrandung markiert den untersuchten Bereich.*

***Tab. 34:** Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus dem markierten Bereich der Probe P1 (s. **Abb. 68**).*

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	40021	40,95	37,51	38,62	4,94	12,06
Carbon	6	35281	38,20	35,00	48,00	4,66	12,20
Calcium	20	103462	15,85	14,52	5,97	0,49	3,09
Silicon	14	126176	11,08	10,15	5,96	0,50	4,50
Aluminium	13	10912	1,28	1,18	0,72	0,09	6,93
Iron	26	1934	0,65	0,59	0,17	0,05	7,54
Potassium	19	3782	0,48	0,44	0,19	0,04	8,81
Sodium	11	951	0,22	0,20	0,14	0,04	19,76
Magnesium	12	1375	0,20	0,19	0,13	0,04	19,12
Chlorine	17	1384	0,17	0,15	0,07	0,03	19,73
Sulfur	16	616	0,07	0,07	0,03	0,03	40,98
		Sum	**109,15**	**100,00**	**100,00**		

***Diagr. 28:** EDX-Spektrum. Die cps (counts per second) der erfassten Elemente im untersuchten Bereich der Probe P1 (s. **Abb. 68** und **Tab. 34**).*

Abb. 69: *Ortsaufgelöste Elementanalyse (EDX-Element Mapping) der vorgefundenen Elemente in Probe P1.*

Abb. 68 zeigt die REM-Aufnahme des äußersten Abschnitts der Proben P1 (siehe **Abb. 66**) mit einer gelben Umrandung, die den untersuchten Bereich markiert. Die Untersuchungsergebnisse aus diesem markierten Bereich der Probe P1 sind in **Tab. 34** zusammengefasst (siehe **Abb. 68**). Die vorgefundenen Elemente sind nach ihrem Vorkommen in Masseprozenten und Atomprozenten geordnet, angefangen mit der größten Menge. Diese Elemente sind auch in **Diagr. 28** dargestellt. Die Peaks im Diagramm zeigen die cps-Ausschläge (counts per second) für jedes erfasste Element in verschiedenen energetischen Bereichen.

Abb. 69 zeigt die ortsaufgelöste Elementverteilung (EDX-Element Mapping) der ausgewählten Elemente in dem Ausschnitt der Probe P1. In der unteren linken Ecke wird das dargestellte Element erwähnt. Das Bild in der ersten Reihe oben links zeigt zur Orientierung nochmals die REM-Aufnahme des Ausschnitts.

Probe P2 (Gesteinsinnere, Tiefenprofiel)

Abb. 70: *REM-Aufnahme der Probe P2. Die gelbe Umrandung markiert den untersuchten Bereich.*

Tab. 35: *Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus dem markierten Bereich der Probe P2 (s.* ***Abb. 70****).*

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	60112	57,36	47,67	60,70	6,70	11,68
Oxygen	8	32497	37,56	31,21	29,84	4,61	12,29
Calcium	20	87953	14,28	11,87	4,53	0,44	3,11
Silicon	14	115836	9,86	8,19	4,46	0,45	4,53
Aluminium	13	4528	0,52	0,43	0,24	0,05	10,10
Iron	26	826	0,28	0,23	0,06	0,04	13,69
Potassium	19	2081	0,28	0,23	0,09	0,04	13,07
Chlorine	17	1132	0,14	0,11	0,05	0,03	23,25
Sulfur	16	622	0,07	0,06	0,03	0,03	41,25
			Sum 120,32	**100,00**	**100,00**		

Diagr. 29: *Spektrum 2. Die cps (counts per second) der erfassten Elemente im untersuchten Bereich der Probe P2 (s.* ***Abb. 70*** *und* ***Tab. 35****.)*

Abb. 71: *Ortsaufgelöste Elementanalyse (EDX-Element Mapping) der vorgefundenen Elemente der Probe P2.*

Die Ergebnisse der Untersuchung der Probe P2 werden ähnlich wie bei Probe P1 präsentiert. **Abb. 69** zeigt eine REM-Aufnahme des äußersten Abschnitts von Probe P2, wie in **Abb. 66** zu sehen ist. Der markierte Bereich dieses Abschnitts ist gelb umrandet und die Ergebnisse der Untersuchung in diesem Bereich sind in **Tab. 35** zusammengefasst (**siehe Abb. 70**). Die vorgefundenen Elemente sind in der Tabelle nach ihrem Vorkommen im markierten Bereich sortiert und in Massenprozenten und Atomprozenten angegeben, beginnend mit der größten Menge in der vierten Spalte von links.
Die charakteristischen Ausschläge in cps (counts per second) für die erfassten Elemente in unterschiedlichen energetischen Bereichen sind in **Diagr. 29** dargestellt. Die Peaks im Spektrum zeigen die Ausschläge für jedes Element.

Abb. 71 zeigt die ortsaufgelöste Elementverteilung (EDX-Element Mapping) der ausgewählten Elemente in dem markierten Bereich der Probe P2. Das dargestellte Element ist in der unteren linken Ecke angegeben. Das Bild in der ersten Reihe oben links zeigt die REM-Aufnahme des markierten Bereichs zur Orientierung.

Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Um die immanenten Bestandteile von Baumberger Kalksandstein von Fremdmaterialien zu unterscheiden, wird bei der Auswertung die chemische Zusammensetzung der Hauptelemente des Baumberger Kalksteins berücksichtigt (*siehe Tab.* **36***) (*VISSER & MIRWALD, 1998, S. 33).[26]

Tab. 36: *„Vergleich der chemischen Anteile an bestimmten Molekülen (Oxiden) [...][von Baumberger Kalksandstein (Allgemein)]. Aufgeführt sind nur die für einen Vergleich interessant erscheinenden Elemente". Werte in M. %.*

CaO	25-39
CO_2	21-31
SiO_2	26-45
Al_2O_2	1,28-2,76
K_2O	0,32-0,73
Fe_2O_3	0,9-1,7
MgO	0,46-0,69
Na_2O	0,06-0,27
P_2O_5	0,06-0,16
FeO	0,17-0,30
K_2O/Al_2O_3	0,19-0,38
MgO/Al_2O_3	0,21-0,47

Sowohl in den Spektren in **Diagr. 28** und **Diagr. 29** als auch in den **Tab. 34** und **Tab. 35** dominieren in beiden Proben fünf Elemente: Kohlenstoff (C), Calcium (Ca), Silicium (Si), Aluminium (Al) und vor allem Sauerstoff (O). Obwohl sie in unterschiedlichen Mengen vorkommen, gehören sie in beiden Fällen zu den Hauptelementen der Proben.
Dies ist nicht überraschend, da diese Elemente immanente Bestandteile des Baumberger Kalksandsteins sind **(Tab. 36**). Die Proben wurden auch in einem Kunstharz eingebettet, sodass auch Kohlenstoff und Sauerstoff vorhanden sind. Die anderen Elemente, die in geringeren Mengen gefunden wurden, sind Eisen (Fe), Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Chlor (Cl) und Schwefel (S).
Die Mengen von Chlor und Schwefel sind in beiden Proben sehr gering und fast identisch. Das gilt auch für Kalium. In Probe P2 fehlen Natrium und Magnesium vollständig. Auffällig ist, dass Probe P2 die doppelte Menge an Eisen im Vergleich zu Probe P1 aufweist. Gleiches gilt für Aluminium und Calcium, die zu den Hauptbestandteilen des Baumberger Sandsteins gehören. Diese Verhältnisse werden auch durch die EDX-Element-Mapping-Bilder bestätigt (siehe **Abb. 70** und **Abb. 71**).

Bei der bereits erwähnten Fluatierung[27] wurden in der Vergangenheit am häufigsten Magnesium-, Aluminium-, Blei- und Zinkfluate eingesetzt. Bei einer Vorbehandlung mit Avantfluat sollten auch Natrium- oder Kalium-Ionen nachweisbar sein. Die EDX-Analyse zeigt keine Fluor-Ionen in beiden Proben, auch Blei- und Zink-Ionen wurden ebenfalls nicht identifiziert. Auffällig ist jedoch, dass in Probe P2, also im von der Oberfläche weiter entfernten Bereich, Na- und Mg-Ionen vollständig fehlen.
Man geht davon aus, dass eventuelle Salzanreicherungen hinter der hydrophoben Zone die üblichen bauschädlichen Salze enthalten, die folgende Ionen beinhalten können: Mg, Na, K, Ca, SO_4, CO_3, NO_3.

Die hier erwähnten Kationen sind ein wesentlicher Bestandteil des Baumberger Kalksandsteins, daher ist die Differenzierung ihrer Herkunft sehr eingeschränkt. Lediglich die Konzentration dieser Ionen in bestimmten Bereichen kann ausgewertet werden. Auch in diesem Kontext ist das Fehlen von Na- und Mg-Ionen in Probe P2 signifikant.

[26] (Analysen des Zollern-Institutes, Bochum).
[27] s. Abschnitt „Fragestellung und Zielsetzung".

Die höheren Mengen an Al-Ionen im vorderen Bereich (Probe P1) deuten möglicherweise auf die Verwitterung einiger Gesteinselemente wie Feldspäte und Glimmer an der Oberfläche hin. Die Ansammlung von Fe- und Ca-Ionen in oberflächennahen Bereichen könnte ebenfalls als Folge der Verwitterung interpretiert werden, als Verlagerung dieser durch kapillaren Transport.

Keines der EDX-Element-Mapping-Bilder zeigt eine eindeutige Grenze in der Gesteinsstruktur.

Fazit

Trotz der vielfältigen Möglichkeiten der angewandten Analyseverfahren war die Untersuchung von vielen Unwägbarkeiten begleitet. Eine der Herausforderungen bestand darin, ein repräsentatives Material zu erlangen, das eine gut dokumentierte früheren Behandlung mit hydrophobierenden Stoffen aufwies, charakteristische Merkmale dieser Behandlung zeigte und eventuell salzbelastet war. Die Probeentnahme und -präparation stellte eine weitere Schwierigkeit dar, da die Probe infolge der Verwitterung stark strukturell geschwächt war, aber dennoch mindestens 1 cm tief reichen und die Erstellung eines Querschnitts ermöglichen musste, ohne das untersuchte Objekt unnötig zu beeinträchtigen.

Obwohl diese Anforderungen anspruchsvoll waren, erschien ein abgefallenes Fragment einer Gewandfalte von der Johannes-Figur der Kreuzigungsgruppe bei Haus Stapel als geeignetes Material. Das Objekt war gut dokumentiert, die Oberfläche stark verwittert und das lose Fragment erlaubte eine relativ schonende Probeentnahme.

Die Tatsache, dass sowohl die Fluatierungs- als auch eventuell benutzte Hydrophobierungsmittel und die üblichen bauschädlichen Salze Ionen aufweisen, die auch im Baumberger Kalksandstein vorkommen, stellte jedoch eine weitere Herausforderung bei der Interpretation der Ergebnisse dar. Insgesamt konnten nicht alle Erwartungen an die Untersuchung erfüllt werden. Die EDX-Element-Mapping-Bilder zeigten keine Strukturen in der Tiefe, die als Fluatierungs- oder Hydrophobierungsgrenze interpretiert werden konnten. Es fehlte sowohl eine feststellbare Behandlungsgrenze als auch eine eindeutige Ansammlung wasserlöslicher Stoffe.

Einige Beobachtungen, wie eine höhere Menge an Al-, Fe- und Ca-Ionen, deuteten auf veränderte Steinstrukturen im vorderen Bereich hin. Die Gründe für diese Veränderungen konnten jedoch nicht eindeutig belegt werden, insbesondere da die Unterschiede sehr gering sind. Es ist wahrscheinlich, dass sie infolge der Verwitterung aufgetreten sind.

Das Fehlen von Na- und Mg-Ionen im hinteren Bereich ist schwer zu interpretieren. Der vordere Bereich kann als Fluatierungs[28]- oder als Versalzungszone interpretiert werden.

Trotz dieser Unsicherheiten zeigt die Untersuchung eindeutig, dass die Steinstrukturen in der Tiefe stark verändert sind.

[28] Obwohl keine Fluor-Ionen festgestellt wurden, gibt es eine Möglichkeit, dass Na-Ionen nachweisbar sind, wenn in der Vergangenheit Magnesiumfluate verwendet wurden und die Vorbehandlung mit Avantfluat durchgeführt wurde, wie im Abschnitt "Fragestellung und Zielsetzung" beschrieben.

6.5 Untersuchung an Objektproben

6.5.1 Tropfenaufsetzmethode

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Ziel:
An Steinschalen bzw. Steinbruchstücken, die an geschädigten Fassaden aus Baumberger Kalksandstein (BKS) entnommen werden können, soll die gezielte Hydrophobierung (Applikation einer wasserabweisenden Imprägnierung) nachgewiesen und die Eindringtiefe durch Ermittlung des hydrophoben Bereiches ermittelt werden.
Vorbetrachtung zum Saugverhalten von bruchfrischem BKS:
Die Anwendung dieses Tests auf bruchfrische BKS-Gesteinsproben der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen zeigt, dass der Baumberger Kalksandstein grundsätzlich als schwach und langsam saugend einzustufen ist. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varietäten oder Sägeflächen und Bruchflächen. Ein aufgesetzter Wassertropfen bildet sofort einen flachen Tropfen, der langsam und allmählich aufgesaugt wird. Die hierfür relevanten Materialkennwerte (Wasseraufnahme: 7-10 M-%; Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert): 2-4 $kg/m^2h^{0,5}$) erklären das langsame Saugverhalten nicht hinreichend. Hilfreich ist hier die Porengrößenverteilung. Mit einem Maximum der Porendurchmesser knapp unterhalb 1µm (gesamt zwischen 10 nm bis etwa 1000 nm) ist ein langsames kapillares Saugen nachvollziehbar. Diese Grundeigenschaft des BKS stellt aber für den Nachweis einer eventuellen wasserabweisenden Behandlung (Hydrophobierung, teilweise auch in Kombination mit einer strukturellen Festigung) eine unbedingt zu beachtende und eher ungünstige Ausgangssituation dar.

Methodik:
Kombiniert werden eine vereinfachte Kontaktwinkelbeurteilung durch Beschreibung der Kugelform und eine qualitative Beschreibung des Wasseraufnahmeverhaltens. Über eine feine Kanüle einer Injektionsspritze werden möglichst kleine Wassertropfen auf die Oberfläche, die Rückseite und vor allem auf eine frisch erzeugte Bruchfläche aufgesetzt. Beschrieben werden die Tropfenform (kugelförmig, halbrund, abgeflacht, breit laufend) sowie das Saugverhalten (Sauggeschwindigkeit: rasch saugend / saugend / wasserabweisend).

Interpretation des Tests:
Eine (chemische) Hydrophobierung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Benetzbarkeit des BKS, was zu einer Abnahme des Kontaktwinkels eines aufgesetzten Wassertropfens führt. Das heißt, ein kugelförmiger Tropfen ist insbesondere auf einer frischen Bruchfläche ein sicheres Indiz für eine Hydrophobierung. Die Breite der wasserabweisenden Zone entspricht der Hydrophobierungstiefe. Bei einer über den gesamten Querschnitt hydrophoben Schale kann die Gesamteindringtiefe des Hydrophobierungsmittels jedoch größer als die Schalendicke sein.

Stark beeinflusst wird diese Prüfung möglicherweise durch folgende Faktoren:

1. einen anzunehmenden Abbau der Hydrophobierung an der Oberfläche
   Der UV-induzierte Abbau führt zu einem typischen Breitlaufen des aufgesetzten Wassertropfens in einem µm-schmalen oberflächennahen Gefügeabschnitt (kein Endringen).
2. durch sekundäre wasserabweisende Effekte (Typ-B-Hydrophobie).
   Die Ursachen für ein verzögertes Saugen über die Oberfläche bis hin zu einer vollständigen Wasserabweisung können Schmutzauflagerungen, mikrobiologische Besiedlung und eine Verengung des oberflächennahen Porenraumes durch Salze sein (fast ausschließlich Gips).

Aus diesen Gründen sind Tests an frischen Bruchflächen notwendige Voraussetzung für begründete Aussagen. Das setzt allerdings voraus, dass bei der Applikation des Hydrophobierungsmittels nennenswerte Eindringtiefen erreicht wurden. Anderenfalls beschränken sich die möglichen Aussagen auf das Saugverhaltens der gegenwärtigen Oberfläche ohne eine sichere Beurteilung der Frage: Chemische Hydrophobierung ja oder nein?

Untersuchungsergebnisse Objektproben

In den folgenden Tabellen sind die Untersuchungsergebnisse zu den Tropfenaufsatztests an Objektproben und Bohrkernen des Torhauses von Haus Stapel, einer Dachvase des Schloss Münster mit der bildhauerischen Darstellung eines Schwerts und eines Buchs, dem Bildstock Marienlinde und dem Löwenportal des Schloss Ahaus aufgeführt und bewertet.

***Tab. 37**: Tropfenaufsetzmethode an Objektproben von Haus Stapel.*

Probe	Beschreibung	Beobachtungen Tropfenaufsetzmethode			
HS-c_M 1	Sandender / schuppender BKS, hydrophobierter Bereich 5 Stücke Haus Stapel, Torhaus, Ostfassade, SüdWest-Ecke, 2. Gesims von oben, unterm Dach	• **Rückgewitterte Oberfläche**: überwiegend wasserabweisend (kugelförmige Tropfen), stellenweise langsam saugend	• **Rückseite**: wasserabweisend (kugelförmige Tropfen) bis rasch saugend	• **Keine typischen Bruchflächen (auskeilende Stücke):** überwiegend wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe nicht sicher bestimmbar (Keile) → tendenziell uneinheitlich
HS-c_M 2	BKS-Stück stellenweise mehrere cm Haus Stapel, Torhaus, Süd-Seite, Ausbruchstück aus stark geschädigtem Gesimsbereich unter dem Dach	• **Rückgewitterte Oberfläche**: bereichsweise wasserabweisend (kugelförmige Tropfen), stellenweise langsam saugend bis saugend	• **Rückseite**: saugend	• **Keine typischen Bruchflächen (auskeilende Stücke):** bereichsweise wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe nicht sicher bestimmbar (Keile) → mindestens 1 cm
HS-c_M 3	BKS-Stück Haus Stapel, Torhaus, Ost-Seite, linke Seite der Tordurchfahrt, Ausbruchstück neben der Dachrinne	• **Intakte Oberfläche (Scharrierung) und rückgewitterte Oberfläche**: überwiegend wasser-abweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Rückseite**: sehr langsam saugend	• **Bruchfläche:** rasch saugend	**Bewertung**: ⇒ **vermutlich keine Hydrophobierung** ⇒ eindeutig **wasserabweisende Oberfläche , aber keine Eindringtiefe** (andere Behandlungsmethode)

***Tab. 38**: Tropfenaufsetzmethode an Objektproben von Haus Stapel Torhaus und Dachvase des Schloss Münster*

Probe	Beschreibung	Beobachtungen Tropfenaufsetzmethode			
HS-c_BK 1	BKS-Bohrkern (∅ 23 mm), festes Gestein, gereinigt Haus Stapel, Torhaus, Nord-Seite, über dem Dach, unterer Stein zwischen den Messstellen M1 und M2, hydrophobierter Bereich Prüfung an 1-2mm dünner **Schale** mit geschwärzter Oberfläche und an einem Reststück	• **Oberfläche**: rasch bis sehr langsam saugend	• **Rückseite**: saugend	• **Bruchfläche Reststück (aus etwa 4 cm Tiefe)**: saugend	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung nicht eindeutig nachweisbar**
MS-a_M 1	Abgefallene **Steinschale** (BKS), Dicke: 4mm Schloss Münster, Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, westliche Seite	• **Oberfläche**: Tropfen breit laufend, stark und rasch saugend	• **Rückseite**: langsam saugend (stellenweise kurzzeitig halbkreisförmiger Tropfen)	• **Bruchfläche**: Tropfen bleibt kugelförmig stehen, außer im vordersten mm (= Abbautiefe der Hydrophobierung)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: 4 mm (Schalendicke)
MS-a_M 2	Abgenommene **Steinschale** (BKS), Dicke: 2-3 mm Schloss Münster, Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, Schwertschneide, westliche Seite	• **Oberfläche**: Tropfen breit laufend, stark und rasch saugend	• **Rückseite**: langsam saugend, stellenweise wasserabweisend (kugelförmige od. halbkugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: 1 mm wasserabweisend, 1 mm rasch saugend (unter der Ofl. = Abbautiefe der Hydrophobie)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung rel. eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: 2-3 mm (Schalendicke)
MS-a_M 3	Abgenommene **Steinschale** (BKS), Dicke: 2 mm Schloss Münster, Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, nördliches Buch, spätere Vierung, Oberseite	• **Oberfläche**: Tropfen breit laufend, stark und rasch saugend	• **Rückseite**: sehr langsam saugend bis wasserabweisend (stellenweise über längere Zeit flache Tropfen)	• **Bruchfläche**: nicht zu beurteilen (Schalendicke 2 mm zu gering)	**Bewertung**: ⇒ **keine eindeutige Aussage** ⇒ tendenziell wie M 2

Tab. 39: *Tropfenaufsatztest an Objektproben von Schloss Münster, Schloss Ahaus und dem Bildstock Marienlinde.*

Probe	Beschreibung	Beobachtungen Tropfenaufsatztest			
MS-a_M 4	Ausgebrochenes BKS-Stück Schloss Münster, Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, nördliches Buch, spätere Vierung	• **Oberfläche**: überwiegend saugend, stellenweise langsam saugend (z. T. kurzzeitig flache Tropfen)	• **Rückseite**: überwiegend saugend, stellenweise langsam saugend (z. T. kurzzeitig flache Tropfen)	• **Bruchfläche**: saugend bis rasch saugend (Tropfenform?)	**Bewertung**: ⇒ **keine eindeutigen Hinweise auf Hydrophobierung** ⇒ einige Schalenbruchstücke weisen reduzierte Saugfähigkeiten auf (Oberflächenphänomene)
BT-M_M 1	**Steinschale**, evtl. mit anhaftender Beschichtung Bildstock Marienlinde, Sockelstein Rückseite, Bereich rechts oben, Nähe Bohrwiderstandsmessung	• **Oberfläche**: überwiegend wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Rückseite**: sehr langsam saugend (flache Tropfen)	• **Bruchfläche**: überwiegend wasserabweisend (halbkugelförmige bis flache Tropfen bleiben stehen oder werden verzögert über den Randbereich aufgesaugt)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobie anzunehmen**
AS-a_W 1	Abgelöste **Steinschale**, Westfassade, Löwenportal, Schloss Ahaus Oberfläche: Risse, Schuppen, Schalen, rückgewittert, stellenweise verschmutzt	• **Oberfläche**: rasch saugend, breit laufend	• **Rückseite**: langsam saugend, stellenweise wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: wasserabweisend in den vordersten 3 mm (Hydrophobierung), dahinter rasch saugend	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: etwa 3 mm
AS-a_W 2	Abgelöste **Steinschale**, Westfassade, Löwenportal Schloss Ahaus Oberfläche: Risse, Schuppen, Schalen, rückgewittert, stellenweise verschmutzt	• **Oberfläche**: saugend (breit laufend), stellenweise wasser-abweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Rückseite**: langsam saugend bis rasch saugend	• **Bruchfläche**: wasserabweisend in den vordersten 4 mm (Hydrophobierung), dahinter rasch saugend	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: mind. 4 mm (ursprüngliche Oberfläche fehlt meist)

Tab. 40: *Tropfenaufsatztest an Objektproben des Löwenportals von Schloss Ahaus*

Probe	Beschreibung	Beobachtungen Tropfenaufsatztest			
AS-a_W 3	Abgelöste BKS-Bruchstücke, Westfassade, Löwenportal, Schloss Ahaus Ecke eines Quaders, feste Oberfläche, verschmutzt	• **Oberfläche**: langsam saugend, breit laufend	• **Rückseite**: wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: mind. 10 mm
AS-a_O 1	Ostfassade, Löwenportal, Schloss Ahaus, Krone, **Steinschale** halbrund, verschmutzt	• **Oberfläche**: langsam saugend, breit laufend	• **Rückseite**: langsam saugend, im dünnen Randbereich wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: wasserabweisend in den vordersten 5mm, dahinter rasch saugend	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: etwa 5 mm
AS-a_O 2	Ostfassade, Löwenportal Schloss Ahaus, Krone, **Steinschale** halbrund, verschmutzt	• **Oberfläche**: saugend, breit laufend	• **Rückseite**: saugend bis rasch saugend	• **Bruchfläche**: langsam bis sehr langsam saugend (flache Tropfen werden langsam aufgesaugt)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung wahrscheinlich, aber nicht eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe ggf. einige mm
AS-a_O 3	Ostfassade, Löwenportal Schloss Ahaus, Krone, Steinschale, stark entfestigt (aufgefächert), verschmutzt	• **Oberfläche**: langsam, stellenweise sehr langsam saugend, breit laufend	• **Rückseite**: saugend bis langsam saugend, stellenweise wasserabweisend (halbkugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: stellenweise wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: etwa 5 mm
AS-a_O 6	Ostfassade, Löwenportal, Schloss Ahaus, Krone, Steinschale stark entfestigt (aufgefächert), verschmutzt Vgl. Probe As-a_O3	• **Oberfläche**: langsam, stellenweise sehr langsam saugend, breit laufend	• **Rückseite**: saugend bis langsam saugend, stellenweise wasserabweisend (halbkugelförmige Tropfen)	• **Bruchfläche**: stellenweise wasserabweisend (kugelförmige Tropfen)	**Bewertung**: ⇒ **Hydrophobierung eindeutig nachweisbar** ⇒ Hydrophobierungstiefe: etwa 10 mm

Auswertung:

An zwei der drei Probenstücke vom **Torhaus** (M1 und M2) konnte mit der Wassertropfenprobe eindeutig eine Hydrophobierung nachgewiesen werden. Aufgrund der keilförmig auslaufenden Probengeometrie konnten die Hydrophobierungstiefen nicht sicher bestimmt werden. An M2 beträgt sie jedoch mindestens 10 mm.

Die dünne Schale von der **Kreuzigungsgruppe** (Hx_M1) zeigt punktuell Merkmale einer Hydrophobierung. Ein eindeutiger Nachweis war jedoch nicht möglich, da es sich um eine geometrisch ungünstige Einzelprobe mit mikrobiologischer Besiedlung handelt (dünne Schale mit verschwärzter Oberfläche).

Die Untersuchungen mit aufgesetzten Wassertropfen an den kleinen Schalenbruchstücken, die an der Fassade von **Haus Alst** (HA_M1 und HA_M2) entnommen werden konnten, lieferten keine Hinweise auf eine Hydrophobierung.

An den Schalenproben vom **Schloss Münster** MS_M1 und MS_M2 ist eine Hydrophobierung mittels Wassertropfenproben eindeutig nachweisbar. Außerdem konnte die Eindringtiefe/Wirkungstiefe ermittelt werden. Das nicht hydrophobe Probenstück MS_M4 zeigt ein deutlich anderes Verhalten im Wassertropfentest. Die Aussagefähigkeit ist stark eingeschränkt, wenn die Schalendicke zu gering ist (MS_M3) und/oder die Beschaffenheit der Probe ungünstig ist (kleinteilige Schalen und Schuppen, MS_M5).

Das Wasseraufnahmeverhalten der beiden BKS-Steinschalen vom **Bildstock Marienlinde in Telgte** deutet auf eine Hydrophobierung hin. Insbesondere die kugelförmigen Wassertropfen an den Oberflächen sprechen für eine frühere Imprägnierung. Eine gewisse Unsicherheit in der Interpretation ergibt sich aus den geringen Schalendicken (die das Aufsetzen von Wassertropfen auf Bruchflächen erschweren bis unmöglich machen) und den „unsauberen" Oberflächen, so dass sekundäre wasserabweisende Effekte nicht ausgeschlossen werden können.

Bei den Messungen am **Löwenportal des Schlosses Ahaus** ist eine Hydrophobierung an nahezu allen Proben eindeutig nachweisbar. Die Hydrophobierungstiefen liegen zwischen 3 und 10 mm und korrelieren in der Regel nicht mit den Schalen-/Bruchstückdicken. Die Hydrophobierung ist an allen Proben oberflächlich abgebaut (breit laufende Wassertropfen). Verschmutzungen führen zu verzögerter Wasseraufnahme beim Tropfentest.

6.5.2 Mikroskopische Dünnschliffanalyse

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

6.5.2.1 Schloss Münster

Tab. 41: *Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Schloss Münster.*

Probe	Beschreibung	Untersuchungsergebnisse Mikroskopie
MS_M 1	Abgefallene Steinschale (BKS) Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, westliche Seite	• Dicke der Schale: etwa 4 mm • keine Gefügeschäden innerhalb der Schale • Aufrauhung an der Oberfläche • evtl. punktuell sekundäre Vergipsung unmittelbar an der Oberfläche (→ REM/EDX)
MS_M 2	Abgenommene Steinschale (BKS) Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, Schwertschneide, westliche Seite	• Dicke der Schale: etwa 3 mm • Keine Gefügeschäden innerhalb der Schale • Oberfläche nicht eindeutig zuordenbar
MS_M 3	Abgenommene Steinschale (BKS) Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dachabschlussvase, nördliches Buch, spätere Vierung, Oberseite	• Dicke der Schale: 2-3 mm • Keine Gefügeschäden innerhalb der Schale • Oberfläche nicht eindeutig zuordenbar
MS_M 5	Schalen / Schuppen (BKS) Süd-Flügel, südlicher Eckrisalit, Dach-abschlussvase, Südseite der Vase	• Dicke der Schale: 4-5 mm • Deutliche Gefügeschäden innerhalb der Schale durch oberflächenparallele Risse • Starke sekundäre Vergipsung im oberflächennahen Gefügeabschnitt

Probe **MS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1421_003

Abb. 72: *Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Keine Risse*

Probe **MS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1421_005

***Abb. 73**: Detail aus **Abb. 72** Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Kein Gips*

Probe **MS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1421_006

***Abb. 74:** Gleiche Probenstelle wie **Abb. 73** unter gekreuzten Polarisatoren Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Kein Gips*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1424_001

***Abb. 75:** Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1424_003

Abb. 76: *Detail aus* ***Abb. 75*** *Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1424_005

Abb. 77: *Detail aus* ***Abb. 75:*** *Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen. Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt.*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1424_006

Abb. 78*: Gleiche Probenstelle wie* ***Abb. 77****unter gekreuzten Polarisatoren Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen. Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt.*

Abb. 79: *Detail aus* ***Abb. 78*** *Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1424_008

Abb. 80: *Wie* ***Abb. 79****+ Lambda-Plättchen. Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt..*

Probe **MS_M5**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt+Lambda

Bildnummer: 19M1424_009

6.5.2.2 Haus Stapel, Torhaus

Abb. 81: *Materialproben und Bohrkerne, Haus Stapel, Torhaus und Kreuzigungsgruppe.*

Tab. 42: *Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Haus Stapel, Torhaus.*

Probe	Beschreibung	Untersuchungsergebnisse
HS_M 1	Sandender / schuppender BKS, hydrophobierter Bereich Torhaus, Ostfassade, SüdOst-Ecke, 2. Gesims von oben, unterm Dach	• Modalbestand BKS: - überwiegend Kalk (meist Fossilbruchstücke) - silikatische Körner (meist Quarz, überwiegend gut gerundet, Größtkorn: 0,1 mm), Glaukonit • miteinander „verpresste“ Kalkbestandteile (meist schwach kompaktiert) • im PolMi keine BM-Phase erkennbar • Kapillarporosität vorhanden (in rissfreien, d.h. intakten, Bereichen) • stark geschädigt: Entfestigung bis mindestens 1,6 cm Tiefe (gesamte präparierte Probendicke) • kein Gips
HS_M 2	BKS-Stück Torhaus, Süd-Seite, Ausbruchstück aus stark geschädigtem Gesimsbereich unter dem Dach	• in allen Punkten identisch HS_M1
HS_M 3	BKS-Stück Torhaus, Ost-Seite, linke Seite der Tordurchfahrt, Ausbruchstück neben der Dachrinne	• geschädigt (aber geringer als M1 und M2) • vereinzelt oberflächenparallele Risse (Bildung von etwa 2 mm breiten Schalen) • stellenweise (punktuell) sekundäre Vergipsung unmittelbar an der Oberfläche
HS_BK 1	BKS-Bohrkern (∅ 23 mm), festes Gestein, gereinigt (DS-Ebene durch die Kanäle der Bohrwiderstandsmessung) Torhaus, Nord-Seite, über dem Dach, unterer Stein zwischen den Messstellen M1 und M2, hydrophobierter Bereich	• Untersuchungsbereich: von der Oberfläche bis in 3 cm Tiefe • intaktes Gefüge • keine Auflockerungen in Oberflächennähe • leichte Verschmutzung der Oberfläche (vermutlich Mikrobiologie) • keine Auflockerungen unterhalb der Oberfläche
HS_BK 2	BKS-Bohrkern (∅ 23 mm), festes Gestein, gereinigt (DS-Ebene durch die Kanäle der Bohrwiderstandsmessung) Torhaus, Nord-Seite, über dem Dach, oberer Stein zwischen den Messstellen M3 und M4, hydrophobierter Bereich	• Untersuchungsbereich: von der Oberfläche bis in 3 cm Tiefe • stellenweise Risse in Oberflächennähe (bis in 0,5 mm Tiefe) • unterhalb des Schadenshorizontes intaktes Gefüge

Probe **HS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1415_001

Abb. 82: *Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben)*

Probe **HS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1415_002

Abb. 83: *Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), schräger Randbereich*

Probe **HS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1415_003

Abb. 84*: Detail aus* ***Abb. 83*** *Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), schräger Randbereich, Mikrobiologie, kein Gips*

Probe **HS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1415_003

Abb. 85: *Detail aus* ***Abb. 84*** *Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), Mikrobiologie, kein Gips*

Probe **HS_M1**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1415_006

***Abb. 86**: Gleiche Probenstelle wie Abb. **85** unter gekreuzten Polarisatoren Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), Mikrobiologie, kein Gips*

Probe **HS_M2**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1416_001

***Abb. 87:** Oberflächenparallele Schuppen.*

Probe **HS_M3**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1417_001

***Abb. 88:** Weitgehend intaktes Gefüge. Vereinzelt oberflächenparallele Risse*

Probe **HS_M3**

Beleuchtung: Polarisation; parallel

Bildnummer: 19M1417_003

Abb. 89: *Detail aus* ***Abb. 88*** *Weitgehend intaktes BKS-Gefüge mit oberflächenparallelem Riss*

Probe **HS_M3**

Beleuchtung: Polarisation; gekreuzt

Bildnummer: 19M1417_004

Abb. 90: *Gleiche Probenstelle wie* ***Abb. 89*** *unter gekreuzten Polarisatoren. Weitgehend intaktes BKS-Gefüge mit oberflächenparallelem Riss*

Korrelation mit den mikroskopischen Gefügeuntersuchungen entlang der Bohrkanäle
(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen, Gerhard D´ham; HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen)

Die Grafik (**Diagr. 30**) zeigt die Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 1 durchgeführte Messungen (gelbe und blaue Kurve) sowie eine vor Ort (am Bauwerk) erfolgte Messung (rote Kurve). Mikroskopisch untersucht wurde der Bohrkern BK1. Die Schliffebene wurde so gelegt, dass beide Bohrkanäle in ihrer gesamten Länge Gegenstand des Präparates sind (siehe **Abb.91**).

Anordnung der Bohrkanäle

Abb. 91: *Schematische Darstellung der Probenpräparation der Bohrkernanalyse*

Diagr. 30 *: Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 1 durchgeführte Messungen.*

Im Lichtmikroskop waren keinerlei Auflockerungen des Steins im Bereich der Bohrkanäle erkennbar. Das entspricht den Bohrprofilen. Die in etwa 2 mm Tiefe gemessene Erhöhung des Bohrwiderstandes kann durch lokale Dichteunterschiede im Gefüge oder härtere Mineralkomponenten verursacht worden sein (z.B. ein oder mehrere Quarzkörner).

Diagr. 31: *Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 2 durchgeführte Messungen.*

Die Grafik (**Diagr. 31**) zeigt die Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 2 durchgeführte Messungen (gelbe und blaue Kurve) sowie eine vor Ort (am Bauwerk) erfolgte Messung

(rote Kurve). Mikroskopisch untersucht wurde der Bohrkern BK2 (**Abb. 81**) . Die Schliffebene wurde so gelegt, dass beide Bohrkanäle in ihrer gesamten Länge Gegenstand des Präparates sind (vergl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).
Im Lichtmikroskop waren unmittelbar an der Oberfläche, bis in etwa 0,5 mm Tiefe, Risse nachweisbar. Dieser schmale Abschnitt wird in den Bohrprofilen nicht ausreichend fein aufgelöst. Im weiteren Verlauf sind keinerlei Auflockerungen des Steins im Bereich der Bohrkanäle erkennbar. Die in den Bohrprofilen vorhandenen Schwankungen (v.a. im Abschnitt 10-20 mm) können im mikroskopischen Bild nicht nachvollzogen werden.

6.5.3 Quantitative chemische Salzanalyse

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen. Markus Rüße; LWL-DLBW)

Die Analysen der Salzkonzentrationen wurden am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg, Arbeitsgruppe Dr. Steiger, durchgeführt.
Das Probenmaterial wird getrocknet, gemahlen und homogenisiert. 500 mg der Probe werden in 25 ml bidestilliertem Wasser eluiert. Im filtrierten Eluat werden die Anionenkonzentrationen (Chlorid, Sulfat, Nitrat) mittels Ionenchromatographie (IC), die Kationenkonzentrationen mittels optischer Emissionsspektrometrie mit Anregung im induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES) ermittelt. Sofern erforderlich werden Natrium und Kalium aufgrund der günstigeren Anregungsbedingungen und der somit niedrigeren Bestimmungsgrenzen mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bestimmt.
Die Salzgehalte werden sowohl als Masseanteil (M-%) als auch unter Berücksichtigung der Atom- und Molekularmassen und der Ladungszahlen als molare Equivalentkonzentrationen (meq/kg) angegeben. Die Verhältnisse der Anionen zu den Kationen können so direkt verglichen und ggf. bestimmten Salzen zugeordnet werden. Außerdem ist über die Anionen-/Kationenbilanz die Vollständigkeit der Analyse hinsichtlich der ermittelten Ionen überprüfbar.

Abb. 92: *Spiralbohrer (Durchmesser 8 mm) mit markierten Segmenten*

Tab. 43: *Probenbezeichnungen, Beschreibungen, Aufgabenstellungen und Untersuchungsmethoden*

Objekt	Proben-Bezeichg.	Beschreibung	Aufgabenstellung	Untersuchungs-methode
Schloss Harkotten, Skulptur Anna	**SH 1**	Abschuppende Oberfläche	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	SH 2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
	SH 3	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
Haus Stapel, Torpfeiler	**HSt-1**	Bohrmehlproben (4 Segmente)	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	HSt-2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
Haus Alst, Wappensteine	**HA 1**	Bohrmehlproben (4 Segmente)	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	HA 2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
	HA 3	Abschuppende Oberfläche um P1		
Haus Schmeing In Borken-Weseke, Fensterlaibungen	**HSm 1**	Bohrmehlproben (4 Segmente)	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	HSm 2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
	HSm 3	Abschuppende dkl. Oberfläche um P1		
Schloss Nordkirchen, Torpfeiler	**SN 1**	Bohrmehlproben (4 Segmente)	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	SN 2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		
	SN 3	Abschuppende dkl. Oberfläche um P1		

6.5.3.1 Entnahmeprotokoll und Auswertung

In den folgenden Protokollen werden die Entnahmeobjekte, Entnahmestellen und Ergebnisse der quantitativen chemischen Salzanalyse aufgeführt.

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter: F. Schlütter /M.Rüße

Datum: 20.07.2022

Befund-Nr.: **SH 1**

Ort: Schloss Harkotten von Korff
Harkotten 1
48336 Sassenberg

Objekt:
Skulptur Anna/ Gewandbereich

Probenentnahmestelle:
Vorderseite der Figur, Hüfthöhe linke Seite

Probenart:
Schuppen der Oberfläche

Methode der Probennahme:
Abnahme einer Abplatzung der Oberfläche

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Schloss Harkotten	**SH 1**	Ab. Ofl.	0,10	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,16	8,6	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			21,7	1,5	0,7		2,3	2,8	2	81,6	24	89

Bemerkung: keine Salzbelastung feststellbar

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
SH 2

Ort: Schloss Harkotten von Korff
Harkotten 1
48336 Sassenberg

Objekt:
Skulptur Anna, Rückseite

Probenentnahmestelle:
Rückseite, innerer rechter Faltenwurf auf Höhe der Wade

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Schloss Harkotten	**SH 2**	0-3 mm	5,26	0,13	0,08	0,21	0,03	0,02	0,01	2,43	7,7	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			1090	20,4	22,1		13,1	4,8	7,7	1210	1133	1236

Bemerkung: sehr hohe Gipsgehalte

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
SH 3

Ort: Schloss Harkotten von Korff
Harkotten 1
48336 Sassenberg

Objekt:
Skulptur Anna, Fußbereich

Probenentnahmestelle:
Vorderseite, Höhe Schienbein der Nebenfigur

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Schloss Harkotten	**SH 3**	0-3 mm	3,76	0,16	0,08	0,24	0,03	0,02	0,02	1,77	9,5	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			782	26,3	23,5		14,4	5,2	12,4	882	832	914

Bemerkung: sehr hohe Gipsgehalte

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HA 1

Ort: Haus Alst
Alst 1
48612 Horstmar

Probenentnahmestelle:
Zurückgewitterte Oberfläche, linker oberer Rand

Objekt:
Wappen 1 Vorderseite

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Alst	**HA 1**	0-3 mm	4,45	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	2,08	9,4	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			927	3	2,8		4,9	4,4	4,1	1040	933	1053

Bemerkung: Gips dominierend, hoch einzustufender Sulfatgehalt, lösliche Salze in geringer Menge

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HA 3

Ort: Haus Alst
Alst 1
48612 Horstmar

Probenentnahmestelle:
Am oberen linken Randbereich der Vorderseite

Objekt:
Wappen 1 Vorderseite, abschuppende Oberfläche, Randbereich zur zurückgewitterten

Fläche

Probenart:
Schuppen der Oberfläche

Methode der Probennahme:
Abnahme der an der Oberfläche liegenden Schuppe

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Alst	**HA 3**	Ab. Olf.	2,54	0,03	0,01	0,04	0,01	0,02	<0,01	1,16	10,3	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			529	5,6	2,9		4,2	4,8	2,6	581	538	593

Bemerkung: Gips dominierend, hoch einzustufender Sulfatgehalt, lösliche Salze in geringer Menge

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HA 2

Ort: Haus Alst
Alst 1
48612 Horstmar

Probenentnahmestelle:
Randschlag links im Übergang zum floralen Ornament

Objekt:
Wappen2 Vorderseite

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Alst	**HA 2**	0-3 mm	1,40	0,10	0,15	0,25	0,06	0,04	0,02	0,93	9,6	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			291	15,9	41,4		24,5	9,4	13,9	466	348	514

Bemerkung: Gips dominierend, hoch einzustufender Sulfatgehalt, lösliche Salze in geringer Menge

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HSm 1

Ort: Haus Schmeing
Holthausener Straße 9
46325 Borken-Weseke

Objekt:
Fensterlaibung – 2. Fenster rechts vom Eingang, rechts unten

Probenentnahmestelle:
Schuppender Bereich an der unteren rechten Fensterlaibung

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Schmeing	**HSm 1**	0-3 mm	0,24	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01	<0,01	0,18	9,3	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			50,6	2,9	5,1		4,8	3,5	1,7	88,4	59	98

Bemerkung: niedriger bis mäßiger Gipsgehalt

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HSm 2

Ort: Haus Schmeing
Holthausener Straße 9
46325 Borken-Weseke

Objekt:
Fensterlaibung links Mitte, Fenster links vom Eingang

Probenentnahmestelle:
Zurückgewitterter Bereich an der Mitte der linken Laibung

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Schmeing	**HSm 2**	0-3 mm	1,81	0,64	0,32	0,96	0,23	0,11	0,02	0,98	9,4	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			377	103	90,5		98	26,8	13,4	487	571	625

Bemerkung: mäßiger Gipsgehalt und erhebliche Nitrat/Chloridgehalte

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
HSm 3

Ort: Haus Schmeing
Holthausener Straße 9
46325 Borken-Weseke

Objekt:
Fensterlaibung links Mitte, Fenster links vom Eingang

Probenentnahmestelle:
Aufschuppender Bereich an der Mitte der linken Laibung

Probenart:
Schuppen der Oberfläche

Methode der Probennahme:
Abnahme der an der Oberfläche liegenden Schuppe

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
Haus Schmeing	**HSm 3**	Ab. Ofl.	7,15	0,65	0,36	1,01	0,22	0,08	0,02	3,25	9,2

Anionen [meq/kg]				Kationen [meq/kg]				Summe	
SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
1490	105	101		95	20,3	12,7	1620	1696	1748

Bemerkung: hoher bis sehr hoher Gipsgehalt und erhebliche Nitrat/Chloridgehalte

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
SN 1

Ort: Schloss Nordkirchen
Schloss 1
59394 Nordkirchen

Objekt:
Torpfeiler rechts, Rückseite

Probenentnahmestelle:

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Schloss Nordkirchen	**SN 1**	0-3 mm	2,46	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02	0,01	1,26	9,5	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			513	4,6	4,4		6,6	3,9	4,3	629	522	644

Bemerkung: sehr hoher Gipsgehalt

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
SN 3

Ort: Schloss Nordkirchen
Schloss 1
59394 Nordkirchen

Objekt:
Torpfeiler rechts, Rückseite

Probenentnahmestelle:

Probenart:
Schuppen der Oberfläche

Methode der Probennahme:
Abnahme der an der Oberfläche liegenden Schuppe

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
Schloss Nordkirchen	**SN 3**	Ab. Ofl.	3,58	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	1,64	9,5

Anionen [meq/kg]				Kationen [meq/kg]				Summe	
SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
746	1,3	1,1		2,9	1,8	1,2	821	748	827

Bemerkung: sehr hoher Gipsgehalt

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter:
F. Schlütter /M.Rüße

Datum:
20.07.2022

Befund-Nr.:
SN 2

Ort: Schloss Nordkirchen
Schloss 1
59394 Nordkirchen

Objekt:
Torpfeiler links, Rückseite

Probenentnahmestelle:

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
Schloss Nordkirchen	**SN 2**	0-3 mm	8,01	0,10	0,05	0,16	0,04	0,03	0,01	3,61	9,4

Anionen [meq/kg]				Kationen [meq/kg]				Summe	
SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
1670	16	14,5		17,9	6,6	5,3	1800	1701	1830

Bemerkung: sehr hoher Gipsgehalt

6.5.3.2 Zusammenfassung und Interpretation Auswertungen

Die Salzanalysen schlüsseln sich in die Werte zum Salzgehalte in M-%, sowie die zugehörigen Ionenequivalente und die Anionen/Kationen-Bilanzen auf. Bei der Interpretation muss zwischen schwer löslichem Gips und leicht löslichen Nitraten und Chloriden unterschieden werden. Leicht lösliche Sulfate sind nicht enthalten, weil das gesamte Sulfat als Gips gebunden ist (s. Ca- und Sulfatbilanzen). Die Nitrat- und Chloridgehalte sind als Analysewerte separat aufgeführt.

Schloss Harkotten (Skulptur der Anna)

Trotz deutlicher Schädigung ist die Skulptur im Bereich der schuppenden Oberfläche (SH 1) nicht salzbelastet. An den anderen beiden Messstellen (SH 2 und 3) liegen sehr hohe Gipsgehalte (4-5 M-% Sulfat) und leicht erhöhte Nitrat/Chlorid-Gehalte vor (etwa 0,2 M-%).

Haus Alst (Wappen)

Auch in den Wappen dominiert der Gips. Die Sulfatgehalte sind mit Werten zwischen 1,4 und 4,5 M-% als sehr hoch einzustufen. Leicht lösliche Salze sind an zwei von drei Messstellen nur in geringer Menge vorhanden HA 1 und HA 3: <0,1 M-%). In der Probe HA 2 ist der Nitrat/Chlorid-Gehalt mäßig hoch (ca. 0,3 M-%).

Haus Schmeing (Fensterlaibungen)

An den ausgewählten Probenentnahmestellen unterscheiden sich die Salzgehalte deutlich. Die Sulfatgehalte reichen von 0,24 M-% (HSm 1) über 1,8 M-% (HSM 2) bis 7,2 M-% (HSm 3). Im Bereich der Proben HSm 2 und HSm 3 liegen zusätzlich zu den hohen bis sehr Gipsgehalten erhebliche Nitrat/Chloridgehalte vor (etwa 1 M-%).

Schloss Nordkirchen (Torpfeiler)

Die Salzbelastung in den Torpfeiler-Proben wird vom Gips dominiert. Hier liegen die höchsten Gipsgehalte aller analysierten Proben vor (2,5 bis 8 M-%) Im Gegensatz dazu sind die Nitrat/Chlorid-Gehalte durchweg sehr niedrig (SN 1 und SN 3: <0,1 M-) bis mäßig erhöht (SN 2: 0,2 M-%).

Fazit

Betrachtet man die zum Teil extrem hohen Gehalte an Gips, so ist ein Mitwirken dieses bauschädlichen Salzes beim Schadensbild der Schalen- und Schuppenbildung anzunehmen. Auch wenn das schwer lösliche und gering migrierende, aber stark kumulierende Salz nicht unbedingt Auslöser des Schadens ist, so trägt es entscheidend zur Schadensintensität und der Irreversibilität somit zur exponentiellen Zunahme des Schadensprozesses bei.

6.5.4 Bohrwiderstandsmessungen am Bohrkern

(Gerhard D´ham, Dorothée Schraeder; HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen)

6.5.4.1 Bohrwiderstandsmessungen mit dem DRMS: zum Messverfahren Gerät und Funktionsweise

Das Drilling Resistance Measurement System (DRMS) wurde in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre im Rahmen eines EU-Projektes[29] zur Untersuchung von Kulturgut aus porösen, mineralischen Materialien entwickelt. Das seit 2001 von der Fa. Sint Technology, Italy gefertigte Messsystem besteht in seiner heutigen Gestalt aus einem umgebauten Akkubohrschrauber ohne Schlagwerk, der mittels einer speziellen Software[30] von einem Rechner aus gesteuert wird.

Abb. 93: *verwendetes Bohrwiderstandsmessgerät DRMS, Gerätenummer 073, Baujahr 2018, Eigentum LWL-DLBW*

Das Gerät besitzt zwei elektronisch gesteuerte Präzisionsmotoren, einen Drehmotor für die Bohrspindel und einen Schrittmotor für die Vorschubeinheit. Folgende Größen werden kontinuierlich gemessen:
Andruckkraft [0-100 N]
Bohrtiefe [0-50 mm]
(bei einer Auflösung von 0,01 mm)
Drehzahl [20-1000 rpm]
Bohrfortschritt [1-80 mm/min]
Drehzahl und Bohrfortschritt werden in der Software voreingestellt und während der Messung konstant gehalten. Als Bohrwiderstand ist die aufgewendete Kraft definiert, die in Abhängigkeit von der Bohrtiefe erforderlich ist, um den voreingestellten Bohrfortschritt konstant zu halten.
Zur Positionierung des gut 5 kg schweren Gerätes am Objekt wird das DRMS auf einem Stativ befestigt und an der Objektoberfläche mit 3 Schrauben als Abstandhalter ausgerichtet, die an der Gerätefront mittels Kontermuttern fixiert werden (**Abb. 94**). Auf diese Weise sollen Lageveränderungen des Gerätes zur Objektoberfläche während einer Messung ausgeschlossen werden, die infolge erhöhter Reibung des Bohrers im Bohrkanal zu Messfehlern führen.
Für Messungen an Probekörpern wird ein zum System gehörender Probenhalter verwendet.

Abb. 94: *Abstandhalter*
Abb. 95: *Probenhalter für Messungen im Labor für Messungen am Objekt*

[29] European EC Hardrock Project (SMT4-CT96-2056)
[30] DRMS Cordless 5.05b (pulegge2630)

Bohrer und Kalibriermaterial ARS

Abb. 96: *PKD-Bohrschneide an Diaber-Bohrern*

SINT bietet für Messungen mit dem DRMS spezielle Bohrer der Fa. Diaber (Italy) in den Durchmessern 3, 5, 7 und 10 mm an. Die Bohrschneiden aus polykristallinem Diamant (PKD)[31] sind flach ausgeformt, wodurch im Idealfall sofortiger vollständiger Bohrschneidenkontakt zum Objekt möglich ist. Das Bohrschneidenplättchen ist in einen Stahlschaft eingelötet, dessen Spiralgänge dem Abtransport des Bohrmehls dienen.
Um Unterschiede in den Schnitteigenschaften einzelner Bohrer infolge kleiner Abweichungen in Schneidengeometrie und Werkstoffzusammensetzung erfassen zu können, v. a. aber um die Schneidenabnutzung im Verlauf einzelner Messungen und Messserien quantifizieren und bei der Messauswertung berücksichtigen zu können, ist ein möglichst homogenes Kalibriermaterial erforderlich. Hierfür bietet SINT ein keramisches Material an, den Artificial Reference Stone (ARS). Eigene Vergleichsmessungen des Autors zeigen, dass ARS-Körper einer Charge nur geringe Unterschiede im Bohrwiderstand untereinander und im Profiltiefenverlauf aufweisen, dass hingegen durchaus relevante Differenzen zwischen verschiedenen Produktionschargen bestehen. Alle für das Projekt „Umgang mit Althydrophobierungen" relevanten Kalibrierbohrungen wurden an den ARS-Körpern der LWL-DLBW durchgeführt.

Abb. 97: *ARS-LWL Artificial Reference Stone im Besitz des LWL-DLBW*

Diagr. 32: Vergleich verschiedener ARS-Körper: ARS1-LWL bis ARS4-LWL mit weitgehend einheitlichem Bohrwiderstandsniveau, andere ARS-Körper (ARS-HAWK) ARS-WTA) mit abweichender Bohrhärte.

Die Kalibrierung von fünf zuvor noch nicht benutzten PKD-Bohrern der LWL-DLBW mit 5 mm Durchmesser erbrachte ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung (**Diagr. 33**). Eine Berücksichtigung von Unterschieden in den Ausgangsschnitteigenschaften der im Projekt verwendeten Bohrer Diaber PKD 5 mm ist daher nicht erforderlich.

[31] Werkstoff aus synthetisch hergestellten Diamanten in regelloser Anordnung mit einem Kobaltanteil < 10 V.-% (https://www.maschinewerkzeug.de/basics/schneidstoffe-beschichtungen/schneidstoffe/artikel/ ultrahartstoffe-pcbn-und-pkd-1211473.html); die Härte ist geringer als bei natürlichem Diamant (https://www.schreurs-tools.de/media/flyer/rz-schreurs-flyer-pkd-cvd-mkd-web.pdf)

Diagr. 33: *Charakterisierung der Ausgangsschnitteigenschaften von 5 PKD-Bohrern der LWL-DLBW*

Nachbearbeitung der Messungen, Korrektur der Effekte durch Abnutzung

Das Messsystem registriert alle 10 µm Bohrtiefe die aktuellen Kraft- und Bohrtiefenwerte. Bei 100 Wertepaaren je 1 mm Bohrtiefe sind die resultierenden Bohrwiderstandskurven von einem sehr unruhigen, schwer zu interpretierenden Verlauf gekennzeichnet (grüne Kurve in **Abb. 98**). Mit der systemeigenen Software kann eine Datenreduktion vorgenommen werden, durch Festlegung eines gleitenden Durchschnitts (Anzahl der Kraftwerte, die gemittelt werden) und der Schrittweite (Abstände der Punkte in mm, für die ein gleitender Durchschnitt berechnet wird). Die Messungen im Rahmen des Projektes wurden mit den Einstellungen Window Points 10 und Step res. 0,1 mm nachbearbeitet (entspricht der gelben Kurve in **Abb. 98**). Eine Exportfunktion ermöglicht die

Abb. 98: *Gestaltungsspielraum der Bohrwiderstandskurve durch unterschiedliche Nachbearbeitung der Messwerte; grün: unbearbeitete Rohdaten; gelb: gleitender Durchschnitt über 10 Messwerte bei 0,1 mm Schrittweite; blau: gleitender Durchschnitt über 100 Messwerte bei 0,1 mm Schrittweite. Es sind viele weitere Varianten der Nachbearbeitung möglich.*

Übernahme der veränderten Daten oder auch der Rohdaten in ein Tabellenkalkulationsprogramm und deren Weiterbearbeitung, insbesondere zur rechnerischen Korrektur der Kraftwertverfälschungen infolge Bohrschneidenabnutzung.[32]

Hierzu wird der Bohrweg aller Messungen im untersuchten Material (BKS) fortlaufend aufaddiert. Gelegentlich erfolgen erneute Kalibrierbohrungen in den identischen ARS-Körper.[33] Bei allen Kalibrierbohrungen werden zunächst der Durchschnittsbohrwiderstand im Tiefenabschnitt 2-8 mm berechnet. Nachfolgend werden diese Durchschnittswerte F_i durch den Durchschnittswert der ersten Kalibrierbohrung (F_0) dividiert. Die erhaltenen Quotienten F_i/F_0 werden über der jeweiligen Gesamtbohrtiefe in einem XY-Diagramm aufgetragen. Dann wird die lineare Regression dieser Punkte ermittelt (**Diagr. 34**). Schließlich erfolgt die Korrektur jedes einzelnen Bohrwiderstandswertes der Messungen im Untersuchungsgegenstand (BKS) mit folgender Formel:

$$Fc_i = \frac{Fm_i}{a + bx_i} \tag{6.5.1}$$

mit Fc_i = korrigierter Kraftwert am Punkt i
Fm_i = gemessener Kraftwert im Punkt i
a = Schnittpunkt der Y-Achse
b = Winkelkoeffizient der Regressionsgeraden
x_i = Gesamtbohrweg bis zum Punkt i

Diagr. 34: *Berechnung einer Korrekturfunktion aus ARS-Kalibriermessungen*

[32] In Anlehnung an J. Delgado Rodrigues; D. Costa (2004): A New Method for Data Correction in Drill Resistance Tests for the Effect of Drill Bit Wear, in: International Journal for Restoration, Vol. 10, No 3, S. 1–18

[33] Bohrtiefe in ARS jeweils 10 mm; diese Strecken werden nicht in die fortlaufende Addition des Bohrwegs in BKS eingerechnet.

Messdurchführung an den Objektproben

Alle Messungen an den Modellobjekten oder Probematerialien der Modellobjekte wurden mit PKD-Bohrern der Fa. Diaber, Durchmesser 5 mm, bei einer Drehzahl von 600 rpm im 3. Gang und einer Eindringgeschwindigkeit von 10 mm/min vorgenommen. Diese Einstellungen entsprechen den Voreinstellungen der Software und werden in relevanter Fachliteratur und von erfahrenen Anwendern empfohlen.[34] Die Bohrtiefe betrug maximal 30 mm. Die Abstützung des Gerätes an den Modellobjekten wurde mittels Einbeinstativ oder Dreibeinfotostativ vorgenommen. Wo dies nicht möglich war wurde das Gerät von Hand gehalten. Sämtliche Bohrungen wurden fortlaufend in einer Tabelle protokolliert. Dies ist eine unerlässliche Voraussetzung für die rechnerische Korrektur der Bohrwiderstandswerte, die infolge der Bohrschneidenabnutzung im Verlauf einer Serie ständig zunehmen.
Vor Beginn der Messungen an den Modellobjekten wurden Tastmessungen an bruchfrischem Baumberger Kalksandstein durchgeführt. Hierbei zeigten sich folgende Tendenzen:

- Unterschiedliche Feuchtekonditionierungen hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Bohrwiderstand.[35]
- Die Orientierung der Schichtung hat vermutlich einen deutlichen Einfluss auf den Bohrwiderstand. Nähere Angaben sind derzeit nicht möglich, da der Schichtungsverlauf am verwendeten Probekörper trotz geowissenschaftlicher Beratung nicht eindeutig zu klären war.[36]

Probleme bei der Gerätehandhabung

Konstruktionsbedingtes Problem der Messgerätführung

Essentielle Voraussetzung für einen störungsfreien Messablauf ist die Vermeidung von Lageveränderungen des Gerätes zum Objekt während der gesamten Messdauer. Diese Bedingung soll durch die sorgfältige Ausrichtung der drei Abstandhalter auf der Objektoberfläche und Abtrag des Gerätegewichtes über das zum Lieferumfang gehörende Einbeinstativ garantiert werden. Im Verlauf der Messung ergibt sich jedoch konstruktionsbedingt durch das kontinuierliche Einfahren des vorderen Geräteteiles eine kreisförmige Gerätebewegung bei fixem Stativaufstandspunkt als Kreismittelpunkt. Eine unveränderte Positionierung am Objekt mit den Abstandhaltern ist nur möglich, wenn der Stativfußpunkt fortwährend um den Betrag der jeweils erreichten Bohrtiefe nachgeführt wird. Dieses theoretische Problem ist umso größer, je kürzer das Stativ eingestellt ist. Nur wenn das Gerät von Hand gehalten wird oder Messungen an Laborproben mittels Probenhalter vorgenommen werden, besteht dieses Problem nicht. Ob der skizzierte Sachverhalt zu einer Verfälschung der Messwerte führt (scheinbare Erhöhung des Bohrwiderstandes durch zusätzliche Reibung des Bohrers im Bohrloch) ist noch nicht ausreichend untersucht.

Verwackeln

Wie bereits im vorherigen Unterkapitel dargestellt, ist die Vermeidung von Lageveränderungen des Gerätes zum Objekt während der gesamten Messdauer zu fordern. Diese Bedingung soll durch die sorgfältige Ausrichtung der drei Abstandhalter auf der Objektoberfläche bei Abtrag des Gerätegewichtes über das zum Lieferumfang gehörende Einbeinstativ garantiert werden. Es zeigte sich aber, dass aufgrund der geringen Distanz zwischen den Abstandhaltern von nur 87 mm im Verlauf der mit bis zu 3 Minuten doch recht langen Messdauer gelegentlich ein Verkippeln des Gerätes zur Seite nicht vermieden werden konnte. Eine sehr deutliche Verbesserung wird erreicht, wenn an Stelle des Einbeinstatives ein Dreibeinfotostativ verwendet wird. Das Maschinengewicht wird dann über zwei Stativbeine abgeleitet, die bei maximaler Spreizung parallel zum Objekt ausgerichtet sind. Das dritte Bein hat keine

[34] Pamplona, M. et al. (2007): Drilling resistance: overview and outlook, in: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften., 158/3, S. 665–676; persönliche Mitteilung Dr. Matthias Kocher, TU München
[35] trocken – 7 mm feucht – ganz durchfeuchtet
[36] Herrn Dr. Hendrik Visser vom ZMK sei für seine Expertise gedankt.

Untergrundberührung. Hierdurch ergibt sich eine weitgehend Verwackler ausschließende Gerätepositionierung. Dagegen ist es sehr anstrengend und damit Fehler anfällig, das Messgerät ohne Stativ ausschließlich mit beiden Händen zu halten. Dies war gelegentlich notwendig, wenn der Abstand der Messstelle zum Untergrund zu gering oder zu groß war, um ein Stativ nutzen zu können.

Negative Kraftmesswerte

Vor Beginn jeder Messung wurde gemäß Betriebsanleitung der angezeigte Wert der Kraftmessdose genullt. Trotzdem zeigten einige Messungen deutlich negative Kraftwerte, was natürlich ohne Sinn ist. Eine Korrektur der Messergebnisse durch Addition aller Kraftwerte einer Messung um den Kehrwert des maximalen Negativbetrages ist möglich und führte meist zu einem deutlich sinnvolleren Kurvenverlauf (siehe **Diagr. 35**).

Da die Ursache(n) dieser Anomalie derzeit noch nicht aufgeklärt sind, wurde jedoch auf eine Auswertung dieser korrigierten Messungen verzichtet und stattdessen alle Messungen mit deutlich negativen Kraftwerten verworfen.

Diagr. 35: *Bohrwiderstandsmessung 1 mit negativen Messwerten, vor und nach Kraftkorrektur.*

Spannungsquelle

Zur Spannungsversorgung des Messgerätes sind zwei Nickel-Metallhydrid-Akkus mit einer Nennspannung von 14,4 Volt und ein Ladegerät im Lieferumfang enthalten. In Baumberger Kalksandstein sind ca. 6 Messungen mit frisch geladenem Akku möglich. Die in der Software angezeigte Spannung fällt dabei von etwa 14,7 Volt auf unter 13 Volt. Die Ladedauer beträgt etwa eine halbe Stunde. In der Regel reicht dies aus, um das vorgesehene Messprogramm ohne Wartezeiten durchführen zu können. Nach Entnahme des aufgeladenen Akkus aus dem Ladegerät ist es allerdings möglich, mit demselben Akku sofort einen neuen Ladevorgang zu starten. Da Metall-Hydrid-Akkus empfindlich auf Überladung und Tiefentladung reagieren, erscheint diese fehlende Sicherung gegen versehentliche Überladung problematisch. Der Hersteller bietet optional ein Netzgerät an.[37] Eine Anschaffung wird vom Autor dieses Berichtes empfohlen.

[37] Bezeichnung: 1-DRMS/PS. Die Kosten betragen 400,- € zuzüglich Transport und Umsatzsteuer; E-Mail Ing. A. Benincasa (SINT) an G. D'ham, 29.10.2019

Verbindungskabel zwischen Messgerät und Rechner

Die Länge dieses Kabels von 1,85 m erwies sich bei einigen Objektmessungen als sehr knapp bemessen. Es wird empfohlen, ein zusätzliches Kabel mit ca. 3 bis 4 m Länge anzuschaffen.

6.5.4.2 Bohrwiderstandsmessungen an Bohrkernen aus Havixbeck

An den Modellobjekten in Havixbeck wurden drei Bohrkerne von ca. 45 mm Länge und 23 mm Durchmesser entnommen, zwei an der Nordfassade des Torhauses (**Abb. 99**) und einer am Sockel der Kreuzigungsgruppe (**Abb. 56**). An ihnen wurden zunächst drei Ultraschalllaufzeitprofile erstellt und nachfolgend je zwei Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen. Anschließend wurde in Ebene der Bohrungen Dünnschliffe präpariert und vom Projektpartner MPA Bremen mikroskopisch untersucht. In den nachfolgenden Diagrammen sind den Bohrwiderstandsprofilen an den Bohrkernen die Profile von in-situ-Messungen in unmittelbarer Nähe der Bohrkernentnahmestellen hinzugefügt.

Abb. 99: *oben links; Lage der Bohrkernentnahmestellen und Messstellen an den Fassaden, oben rechts; Lage der Messstellen an der Gebäudeecke, Mitte links; Übersicht Messstellen 1 bis 5, Mitte rechts; Übersicht Messstellen 6 bis 9; Reihe unten von links nach rechts, Messstellen 1+2; 4+3 ;5; 6+9; 8+7.*

Diagr. 36: *Havixbeck, Haus Stapel, Torhaus, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 1 (Bohrschneidenabrieb korrigiert)*

Ergebnisse am Bohrkern HxTor_BK1 und in situ Messung HxTor 9	HxTor_BK1a: Abschnitt 1-29,9 mm: Mittelwert 7,0 N, Variationskoeff. 18 % HxTor_BK1b: Abschnitt 1-29,9 mm: Mittelwert 6,2 N, Variationskoeff. 10 % HxTor 9: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 7,8 N, Variationskoeffizient 22 % Die drei Kurven weisen ein ähnliches Grundniveau zwischen 6 und 8 N auf. Auffällig ist bei Messung HxTor_BK1a im Abschnitt 1-2 mm ein deutlich erhöhter Bohrwiderstand bis 13 N und im Abschnitt 6-11 mm ein moderat erhöhtes Niveau zwischen 8 und 10 N. Die in-situ-Messung HxTor 9 weist in den Abschnitten 4-7 mm und 10-11 mm peaks bis 14 N auf, die keine Entsprechungen bei den Bohrkernmessungen haben.
Interpretation	Die Profile zeigen überwiegend ein ausgeglichenes Niveau über die jeweilige Bohrtiefe. Lokal erhöhte Bohrwiderstände dürften auf Gefüge-inhomogenitäten und/oder Unregelmäßigkeiten in der Messdurchführung (Verwackler) zurückzuführen sein, letzteres insbesondere bei der in-situ-Messung. Diese peaks deuten nicht auf frühere Festigungsmaßnahmen hin.

Diagr. 37: *Havixbeck, Haus Stapel, Torhaus, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 2 (Bohrschneidenabrieb korrigiert).*

Ergebnisse am Bohrkern HxTor_BK1 und in situ Messung HxTor 5	HS_BK2a: Abschnitt 1-30 mm: Mittelwert 7,6 N, Variationskoeffizient 22 % HS_BK2b: Abschnitt 1-29,9 mm: Mittelwert 8,7 N, Variationskoeffizient 15 % HxTor 5: Abschnitt 1-19,9 mm: Mittelwert 9,6 N, Variationskoeffizient 11 % Die dargestellten Messergebnisse wurden an einer makroskopisch inhomogenen Varietät des Baumberger Kalksandsteines mit linsenförmigen Einschlüssen bis 3 mm Länge ermittelt. Es besteht überwiegend eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den Bohrwiderstandsprofilen BK2b und der in-situ-Messung HxTor 5. Der Kurvenverlauf kann als lebhaft bezeichnet werden, der Bohrwiderstand schwankt bei diesen Profilen um den Faktor 2 zwischen 6 und 12 N. Größere Schwankungsbreiten von 5 bis 13 N und damit auch größere Abweichungen von den vorgenannten Profilen zeigt die Messung BK2b. Besonders auffällig ist eine abrupt auftretende Zone niedrigen Bohrwiderstandes im Tiefenabschnitt 10-12 mm. Bei beiden Messungen am Bohrkern ist ab einer Tiefe von 15 bzw. 20 mm eine Verminderung der Schwankungen bei zugleich vermindertem Bohrwiderstand festzustellen.
Interpretation	Die größere Schwankungsbreite der Bohrwiderstände dürfte mit der Grobkörnigkeit des Gefüges in Zusammenhang stehen. Es bleibt abzuwarten, ob diese Hypothese durch die Analyse des Bohrkerndünnschliffes bestätigt werden kann und ob sich die Unterschiede zwischen den beiden Bohrkernprofilen durch natürliche Gefügeanomalien hinreichend erklären lassen. Insgesamt können die Profilverläufe noch als ausgeglichen bewertet werden. Sie geben keine Hinweise auf verwitterungs- oder konservierungsbedingte Veränderungen.

***Diagr. 38**: Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 3 (Bohrschneidenabrieb korrigiert)*

Ergebnisse Bohrkern HxKG_BK3 und in situ Messung HxKG 4

HK_BK3a: Abschnitt 1,7-30 mm: Mittelwert 7,1 N, Variationskoeffizient 15 %
HK_BK3b: Abschnitt 1,7-30 mm: Mittelwert 7,4 N, Variationskoeffizient 24 %
HxKG 4: Abschnitt 1-25,6 mm: Mittelwert 10,1 N, Variationskoeffizient 29 %

Bei der Bohrkernentnahme löste sich von der Oberfläche ein dünnes Gesteinsplättchen (Schale) von knapp 2 mm Dicke ab. Aus diesem Grunde wurden im obenstehenden Diagramm die Bohrwiderstandsprofile des Bohrkerns um 1,7 mm eingerückt.
Die beiden Bohrwiderstandsprofile des Bohrkerns zeigen ab 8 mm Bohrtiefe ein gleichbleibendes Niveau um 7 N bei moderaten Schwankungen und sehr guter Übereinstimmung. Hiervon abweichend weist nur Bohrung HxKG_BK3b eine deutlich festere Zone in Oberflächennähe auf: In einem schmalen Abschnitt von 2-3 mm Tiefe liegt der Bohrwiderstand um den Faktor 2,5 und im Abschnitt 3-7 mm Tiefe noch um den Faktor 1,5 höher als im hinteren Tiefenabschnitt.
Profilverlauf und -niveau der in-situ-Messung HxKG 4 weist hierzu deutliche Unterschiede, aber auch Gemeinsamkeiten auf: Schwankungsbreite und Bohrwiderstand sind generell höher, doch sind auch hier eine deutlich festere oberflächennahe Zone und ein relativ ruhiger rückwärtiger Bereich ab 4 mm Bohrtiefe festzustellen. Oberflächennah wechseln zwei steilflankige, schmale Zonen hoher Festigkeit mit Festigkeitssenken ab.

Interpretation

Das Bohrwiderstandsprofil der in-situ-Messung ist als Schalenprofil zu interpretieren (Abfolge von zwei dünnen Schalen und Schwächezonen).
Nur eines der beiden Profile am Bohrkern zeigt ein stark überhöhtes Bohrwiderstandsniveau, jedoch ohne Ansatz einer Mürbzone zum anschließenden Kern. Der Verlust einer dünnen Gesteinsscheibe bei der Bohrkernentnahme macht aber deutlich, dass auch diese beiden Profile dem Typus Schalenprofil zuzuordnen sind.

6.5.5 Ultraschalllaufzeitmessung an Bohrkernen

(Gerhard D´ham, HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen)

6.5.5.1 Zur Untersuchungsmethode der Ultraschallmessung

Die Untersuchungen wurden mit einer Ultraschallmessvorrichtung der Fa. Geotron Elektronik vorgenommen.[38] An den Bohrkernmantelflächen wurden 6 Messachsen im Abstand von 60° angezeichnet, an denen bis in 30 mm Tiefe Messabstände von 2 mm und nachfolgend von 5 mm abgetragen wurden. Die Durchschallung der Bohrkerne in 3 Messebenen sollte eine Nivellierung etwaiger Einflüsse der Schichtung bewirken.

6.5.5.2 Untersuchungsergebnisse Ultraschalllaufzeitprofil

***Diagr. 39**: Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK1 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse)*

***Diagr. 40:** Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK2 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse)*

***Diagr. 41:** Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK3 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse)*

[38] Ultraschall-Generator USG 40, Frequenzeinstellung 80 kHz, Oszilloskop UKS-D, Preamplifier VV 41, Dehnwellen-Prüfköpfe UPG-D / UPE-D mit Tastspitzen von 2 mm Durchmesser, trockene Ankopplung, Software LightHouse UMPC, Version 1.0.3 (2015) "Das Messverfahren ist beschrieben in: Dimmig, A.; Erfurt, W (1997): Neue Methoden zur Bestimmung der Eindringtiefe und Wirksamkeit von Verfestigern, in: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 3. Jg., S. 235-252."

Ergebnisse Ultraschallprofil-messungen *an Bohrkernen*	Sämtliche Profile zeigen nur sehr geringe Schwankungen. Auch bei Spreizung der Darstellung durch ausschnitthafte Skalierung der Y-Achsen (s. Diagramme auf der rechten Seite) verbleiben die Mittelwertkurven aus jeweils 3 Messprofilen auf gleichem Niveau.
Bewertung	Insbesondere an Bohrkern HS_BK 3 war dies ausweislich der stark erhöhten Bohrwiderstandswerte in 3 mm Tiefe nicht zu erwarten. Die Kurven erlauben anscheinend keine Rückschlüsse auf verwitterungs- und/oder konservierungsbedingte Gefüge- und Festigkeitsunterschiede im Profilverlauf. Das Messverfahren ist in dieser Form daher für Baumberger Kalksandstein wenig geeignet.

6.6 Untersuchung an Nachstellproben

Die umfangreichen Untersuchungen an bruchfrischem Baumberger Kalksandstein und die Untersuchungen in situ – also vor Ort am Objekt – sowie an Objektproben zeigen eine weite Streuung und verdeutlichen das Hauptmerkmal der Objekte aus durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein: die Heterogenität der Objektzustände von hydrophober zu nicht hydrophober Oberfläche. Aufgrund der Aktenlage sind die Objektzustände in aller Regel nicht eindeutig früheren Maßnahmen – z.B. einer Hydrophobierung oder Festigung/Hydrophobierung, etc. – zuzuordnen.
Im Folgenden sollen anhand von hydrophobierten Nachstellproben, die Auswirkungen auf die petro-physikalischen Eigenschaften von Baumberger Kalksandstein untersucht werden.

6.6.1 Hydrophobierung – Begriffsdefinition

(Peter Kozub; CICS)

Die Definition des Begriffs „Hydrophobierung" ist in der Literatur nicht einheitlich. Es werden dabei nicht nur verschiedene Begriffe als Synonyme benutzt (Hydrophobierung, Tiefenhydrophobierung, Imprägnierung, imprägnierende Hydrophobierung), auch der Kontaktwinkel, als Maß für den Ausprägungsgrad der Hydrophobie von Stoffen (Hydrophobizität) wird unterschiedlich angegeben. Anbei einige Beispiele aus den Publikationen in deutschsprachigen Raum aus verschiedenen Zeiten:

Hydrophobie kommt aus dem Altgriechischen (ὕδωρ *hýdor* „Wasser" sowie φόβος *phóbos* „Furcht") und bedeutet wörtlich „wassermeidend". Nach IUPAC-Definition ist die Hydrophobie der Zusammenschluss unpolarer Gruppen oder Moleküle in einer wässrigen Umgebung, aufgrund der Tendenz von Wasser, unpolare Gruppen oder Moleküle auszuschließen. Mit diesem Fachausdruck aus der Chemie werden Substanzen charakterisiert, die sich nicht mit Wasser mischen und es auf Oberflächen meist „abperlen" lassen […].
Unpolare Stoffe wie Fette, Wachse, Alkohole mit langen Alkylresten – also mit Ausnahme von Methanol, Ethanol und Propanol– Alkane, Alkene usw. sind hydrophob […].
Allgemein werden Oberflächen mit einem Kontaktwinkel von mehr als 90° gegenüber Wasser als hydrophob bezeichnet […].
Hydrophobe Oberflächen bestehen in der Regel aus hydrophoben Substanzen oder sind von diesen bedeckt. Beispiele sind die Beschichtung von Oberflächen mit PTFE (Teflon) oder die Imprägnierung von Isolierstoffen und Textilien mit hydrophoben Stoffen wie Wachs oder Paraffin […].[39]

[39] „Hydrophobie" auf Wikipedia. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrophobie (abgerufen: 7.12.2019)

Der Zweck einer **Hydrophobierung** besteht darin, die Menge des von einem porösen Material aufgenommenen Kapillarwassers zu reduzieren. Da Wasser an den meisten Schädigungsprozessen beteiligt ist (z.B. Auflösung von Kalzit, Eindringen von reaktiven sauren Luftschadstoffen, Quellung, Frost), scheint die Hydrophobierung ein sinnvolles Konzept zur Verminderung der Verwitterungsgeschwindigkeit von Steinen zu sein. Im Idealfall breitet sich ein Wassertropfen nicht auf einer behandelten Oberfläche aus, sondern bleibt mehrere Stunden lang kugelförmig mit einem Kontaktwinkel von > 120°, bis er verdunstet. (SNETLAGE & WENDLER, o.J.)

Unter **Hydrophobieren** wird die wasserabweisende Ausrüstung eines Baustoffes verstanden. Diese wird aufgrund eines physikalisch-chemischen Effektes möglich, der sich aus den Kapillargesetzen ableiten lässt. Der Benetzungswinkel des Wassers wird zur Baustoffoberfläche hin stabilisiert und nimmt einen Wert zwischen 90 und 180 Grad an. Im Unterschied dazu liegt bei den benetzbaren, nicht hydrophoben, also hydrophilen Baustoffen der Benetzungswinkel beim Saugvorgang im Kapillarsystem unter 90 Grad und strebt dem Wert 0 zu. Diesen Betrachtungen über den Benetzungswinkel liegt die physikalische Gleichung über die kapillare Steighöhe zugrunde. Darin geht auch der Kosinus des Benetzungswinkels ein: wird der Benetzungswinkel größer als 90 Grad, nimmt der Kosinus einen negativen Wert an, die maximale mögliche Steighöhe in den Kapillaren wird ebenfalls negativ, das heißt die Saugfähigkeit der Kapillare wird aufgehoben. Es handelt sich dann um die sogenannte Kapillardepression.
Danach versteht man also unter Hydrophobieren einen Imprägniervorgang, mit dessen Hilfe der Benetzungswinkel des Wassers gegenüber dem Baustoff auf einen Wert größer als 90 Grad angehoben wird. Die kapillare Saugfähigkeit wird dadurch aufgehoben, die Baustoffe werden in ihrer Wasseraufnahmefähigkeit stark reduziert (hydrophobiert), ohne daß die Wasserdampfdurchlässigkeit wesentlich verändert wird. Es erfolgt nämlich keine Abdichtung der Kapillaren, sondern eine Beschichtung der Kapillarwände unter Beibehaltung der für die Diffusionsvorgänge notwendigen Offenporigkeit. Hydrophobierungen sind demzufolge keine Abdichtungsmaßnahmen (WEBER, 1994, S. 407).

[...] Im Allgemeinen soll jedoch durch eine solche Schutzmaßnahme das Erscheinungsbild eines Bauwerks nicht verändert werden. In diesem Zusammenhang hat sich die Anwendung **imprägnierender Hydrophobierungen** als zielführend erwiesen. Aufgrund ihrer niedrigen Viskosität und chemischen Struktur ist es den heute hauptsächlich auf Alkyltrialkoxysilanen [...] basierenden imprägnierenden Hydrophobierungen möglich in poröse Substrate einzudringen und deren Porenraum hydrophob auszukleiden. Ein auf diese Weise behandeltes Bauteil erhält an seiner Oberfläche und im darunterliegenden oberflächennahen Bereich eine als Barriere gegenüber flüssigem Wasser wirkende Schicht. Der Porenraum innerhalb dieser Schicht soll hierbei jedoch nicht versiegelt werden um weiterhin den Transport von Wasserdampf durch das Porensystem zu gewährleisten. (WTA-Merkblatt 3-17-2009; ANTONS, 2017, S.19)

6.6.2 Ausgewählte Hydrophobierungsmittel

(Peter Kozub; CICS)

6.6.2.1 Produktinformation

Einführung

Bei den Hydrophobierungsmittel auf Basis siliciumorganischer Verbindungen handelt es sich um Silikone in Form von verschiedene Typen von kurzkettigen Silanen und Siloxanen, die im Stein alle zu sehr ähnlichen Strukturen kondensieren und ein endgültigen Wirkstoff Polysiloxan (Siliconharz) bilden sollen (SNETHLAGE & WENDLER, o.J.).

Abb. 100: *Herstellung verschiedener siliciumorganischer Hydrophobierungsmittel aus Trichloralkylsilan. Erforderliche Reaktionsschritte zur Bildung eines Silikonharzfilms im Porenraum des Steins. (SNETHLAGE & WENDLER,o.j.).*

Die allermeisten am Markt befindlichen Hydrophobierungsmittel bestehen aus einem Gemisch mehrerer hydrophobierend Wirkenden Substanzen und diverser Hilfsstoffe. Viele besitzen nur eine hydrophob wirkende Substanz. Einige Produkte sind Mischungen mit ganz anderen Substanzen (z.B. Kieselsäureestern), die meist eine verfestigende Wirkung haben. Allgemein lassen sich die Hydrophobierungsmittel auf Basis siliciumorganischer Verbindungen folgend unterteilen:

a) Alkoxysilane (oft "Silane" genannt)

Diese kommen im Handel sind in unterschiedlichen Formen vor:

- gelöst in wasserfreien Alkoholen (z.B. Isopropanol)
- gelöst in aliphatischen Lösemitteln
- emulgiert in Wasser

  Beispiel 1: Funcosil SN (Remmers)

  anhydrolisiertes Silan (also eigentlich niedermolekulares Alkoxysilanol), gelöst in Isopropanol

  Beispiel 2: Funcosil WS (Remmers)

  Octyltriethoxysilan, Emulsion in Wasser

b) Alkoxysiloxane (oft "Siloxane" genannt) /Siliconharze (Alkylpolysiloxane)

Im Handel ebenfalls in unterschiedlichen Formen:

- gelöst in aliphatischen Lösemitteln
- emulgiert in Wasser.

  Beispiel 1: Funcosil SNL (Remmers)
  Beispiel 2: Ceretec CT 12 (Ceresit)
  Beispiel 3: Vesterol Siloxan (Hahne)

c) Silan/Siloxan Gemisch

Meistens im Handel als Microemulsions(konzentrat), (Silane und oligomere Alkoxysiloxane im Gemisch)

Beispiel 1: Ceretec CT 11 (Ceresit)
Beispiel 2: Fassadenimrägnierung Colfirmit (Rajasil)
Beispiel 3: Hydrophobierung LF (Ispo)
Beispiel 4: Sikagard 702 W-Aquaphob (Sika)
Beispiel 5: PCI-Siliconal W (PCI Augsburg)
Beispiel 6: Vesterol SSW (Hahne)
Beispiel 7: StoCryl HC 100 (StoCretec)
Beispiel 8: Baysilone Impregnating Cream TP 3803 (GE-Silicones)

Andere Produkte

- SILRES BS 290 (Wacker Chemie AG) lösungsmittelfreies Silan-Siloxan-Gemisch, Anwendungsbereich: laut Hersteller für Kalksandstei und Sandstein
- SILRES BS SMK 1311 (Wacker Chemie AG) lösungsmittelfreies Silan-Siloxan-Mikroemulsion, Anwendungsbereich: laut Hersteller für Kalksandstei und Sandstein
- SILRES BS 1001 (Wacker Chemie AG) lösungsmittelfreies Silan-Siloxan-Emulsion, Anwendungsbereich: laut Hersteller für Kalksandstei und Sandstein
- Firma Wacker bietet zahlreiche Produkte in diesem Bereich (s. Wacker-Info-Broschüre) an.
- Funcosil FC Fassadencreme (Remmers) Imprägniercreme auf Siloxanbasis, Anwendungsbereich: zur imregnierende Hydrophobierung
- Funcosil SL (Remmers) oligomere Siloxanlösung, niedermolekulares Alkylalkoxysiloxan mit Additiven, Anwendungsbereich: Kalksandstein
- Ebenso die Firma Remmers liefert viele Produkte mit hydrophober Wirkung (auch in Verbindung mit Festigung z.B. KSE H)

a) Gemische

Um die größtmögliche Produktähnlichkeit zu früheren Produkten zu erhalten, entschied man sich für Funcosil SNL[40] der Fa. Remmers, Löningen, als Versuchsprodukt. Dieses Handelsprodukt sollte ein weit verbreitetes Produkt sein, das seit ca. 30-40 Jahre in dieser oder anderer Zusammensetzung im Handel ist. Es sollte den historisch verwendeten Produkten am ähnlichsten sein und ist derzeit gut verfügbar.

[40] Laut dem Sicherheitsdatenblatt vom 28.7.2014, Version 1, besteht das Hydrophobierungsmittel Remmers Funcosil SNL zu über 80 % aus Lösemitteln und zu 5 bis 10 % aus Alkylalkoxysilan. Dabei handelt es sich angabegemäß um Triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan (Triethoxyisooctylsilan). Die Messungen mit GC-MS in den oben erwähnten Projekt, an reinem, flüssigen Funcosil SNL konnten mit den Herstellerangaben nicht in Übereinstimmung gebracht werden, stattdessen wurden als Wirkstoffe Methyltrimethoxysilan, Dodekamethylcyclohexasiloxan und daneben verschiedene Lösungsmitteln detektiert

Auswahl Hydrophobierungsmittel

Als „reines" Hydrophobierungsmittel wurde das Produkt **Funcosil SNL** (SNETHLAGE & WENDLER o.J.) von der Firma Remmers, Löningen ausgewählt. Dieses derzeit gut verfügbare Handelsprodukt ist ein weit verbreitetes Produkt, das seit ca. 30-40 Jahre Verwendung fand und den historisch verwendeten Produkten am ähnlichsten ist. Das Produkt ist auch in anderen Forschungsprojekten zu Hydrophobierung eingesetzt worden[41], so kann das Projekt an die vergleichbare Daten bzw. bereits vorhandene Daten anknüpfen.

Als ein Gemisch von Hydrophobierungsmittel und Festiger, das ebenso oft bei der Behandlung von Bauberger Kalksandstein verwendet wurde, entschied man sich für das Produkt **KSE H** ebenso von der Firma Remmers, Löningen. Dieses Produkt kommt den früher oft verwendeten „experimentellen Produkten" sehr nahe[42].

6.6.2.2 Produktbeschreibung

Funcosil SNL (nur Hydrophobierung) von der Firma Remmers, Löningen.

Laut aktuellen technischen Merkblatt der Firma Remers (Stand 23.04.2019)[43] handelt es sich um farblosen, hydrophobierenden, lösemittelhaltigen Imprägnierungsmittel auf **Silan-/Siloxanbasis** mit einem Wirkstoffgehalt ca. 7 M.-%.

Diese Angaben suggerieren, dass es sich dabei um ein Produkt handelt, der zu der Gruppe der Hydrophobierungmittel, die auf Silan und Siloxan Gemische basieren gehört.

Das widerspricht den Angaben aus den aktuellen Sicherheitsblatt zu diesem Produkt[44]. Laut diesen Blatt (Stand 23.04.2019) ist lediglich **Trimethoxy(methyl)silan** mit der CAS[45]: 1185-55-3[46] als Wirkstoff angegeben, das im einem Lösungsmittelgemisch (Kohlenwasserstoffe, C9-C11, n-Alkane, Isoalkane, Cyclene) gelöst ist. Ein zusätzlicher Hinweis begrenzt dabei den Benzol-Gehalt des Produkts auf 0,1%.

Strukturformel von Trimethoxy(methyl)silan[47]

[41] Z.B. DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, "Evaluierung und modellhafte Anwendung von harten UV-Strahlern zum Abbau von Althydrophobierungen auf Silikonbasis". Abschlussbericht 2017.

[42] Laut KOESTLER, Robert J (2000): Polymers and resins as food for microbes. In: Ciferri, O. / Tiano, P. / Mastromei, G. (Hrsg.)(2000): Of microbes and art. The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage. p. 164 bestand Tegovakon T aus „Tetraethoxysilane [Tetraethylsilikat mit CAS: 78-10-4] and methyltriethoxysilane [Trimethoxy(methyl)silan mit der CAS: 1185-55-3] [und] solvents". Somit ist Tegovakon mit KSE H, das Triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan (CAS: 35435-21-3) als hydrophobe Komponente besitzt, nicht vergleichbar.

[43] Funcosil SNL. Technisches Merkblatt, Produktnummer 0602, 0602 TM-3-311 08/19 EW_AMy_Jen, p. 1f. (www.remmers.de, abgerufen am 10.09.2020).

[44] Funcosil SNL. Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31, Versionsnummer 6, Druckdatum: 23.04.2019, überarbeitet am: 23.04.2019, p. 2f. (www.remmers.de, abgerufen am 10.09.2020).

[45] Die CAS-Nummer (auch CAS-Registrierungsnummer und CAS-Registernummer, engl. CAS Registry Number, CAS = Chemical Abstracts Service) ist ein internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe. Der Überprüfung und Abgleich der CAS-Nummer erfolgte über der Datenbank der European Chemicals Agency entnommen (https://echa.europa.eu/de/home, abgerufen am 10.09.2020).

[46] Das übereinstimmt mit den Angaben von 2016 allerdings ohne Octamethylcyclotetrasiloxan (≤ 0,5 %, CAS-Nr. 556-67-2).

[47] Die Strukturformel der Chemikalien wurden aus der Datenbank der European Chemicals Agency entnommen (https://echa.europa.eu/de/home, abgerufen am 10.09.2020).

Ebenso verschieden sind, die Angaben zur Wirkstoffgehalt. In den Sicherheitsblatt ist die Menge von Trimethoxy(methyl)silan auf ≥0,1-<1% begrenzt und die Menge von Lösungsmittelgemisch mit 80-100% angegeben[48].

In Projektverlauf wurde, um die größtmögliche Produktähnlichkeit zu früheren Produkten zu erhalten, ebenso Funcosil SNL der Firma Remmers, Löningen ausgewählt. [49]
Laut dem Sicherheitsdatenblatt aus der Anfangsphase des Projektes (Stand 28.7.2014, Version 1), besteht das Hydrophobierungsmittel Remmers Funcosil SNL zu über 80 % aus Lösemitteln und zu 5 bis 10 % aus Alkylalkoxysilan mit der CAS-Nr. 35435-21-3. Dabei handelt es sich angabegemäß um **Triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan**[50].

Strukturformel von Triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan

Die im Projekt durchgeführte Messungen mit GC-MS von Dr. Hartmann, ATU an reinem, flüssigen Funcosil SNL konnten mit den Herstellerangaben nicht in Übereinstimmung gebracht werden, stattdessen wurden als Wirkstoffe **Methyltrimethoxysilan**[51]**, Dodekamethylcyclohexasiloxan**[52] und daneben verschiedene Lösungsmitteln detektiert.[53]

Strukturformel von Dodecamethylcyclohexasiloxane

Möglicherweise auf Grund der Nachfragen der Projektbeteiligten aktualisierte die Fa. Remmers im Jahr 2016 ihren Sicherheitsdatenblatt zu diesen Produkt (Stand: 26.10.16)[54]. Als Wirkstoff wurde damals **Methyltrimethoxysilan** (≤ 1 %, CAS-Nr. 1185-55-3) und **Octamethylcyclotetrasiloxan** (≤ 0,5 %, CAS-Nr. 556-67-2) mit > 80 % Lösemittel angegeben.[55]

[48] Die Angabe „bis 100%" ist sicher ein Versehen. Das Produkt kann nicht ausschließlich aus den Lösungsmitteln bestehen.
[49] DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, Abschlussbericht 2017, p. 12f.
[50] DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, Abschlussbericht 2017, p. 13.
[51] Anderer Name: Trimethoxy(methyl)silan mit der CAS: 1185-55-3
[52] CAS: 540-97-6
[53] DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, Abschlussbericht 2017, Bericht von Dr. Hartmann vom 2.11.2016, Anhang 2.4.
[54] Funcosil SNL. Technisches Merkblatt, Produktnummer 0602, Version 3, 0602 TM Funcosil SNL_11 16, EW-JEn-Amy. aus: DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, Abschlussbericht 2017, p. 13.
[55] DBU-Förderprojekt Az. 31540/01, Abschlussbericht 2017, p. 13.

Strukturformel von Octamethylcyclotetrasiloxane

Auch in jetzigen Zeitpunkt muss davon ausgegangen werden, dass der Hersteller die Zusammensetzung von Funcosil SNL nochmals geändert hatte.[56]

KSE H (Hydrophobierungsmittel und Festiger) von der Firma Remmers, Löningen

Laut aktuellen technischen Merkblatt der Firma Remers (Stand 23.04.2019)[57] handelt es sich um lösemittelfreier Steinfestiger auf Kieselsäureester (KSE)-Basis mit zusätzlicher hydrophobierender Wirkung mit einem Wirkstoffgehalt von ca. 99 M.-%.[58]

Im Sicherheitsdatenblatt[59] werden **Tetraethylsilikat** mit CAS: 78-10-4 (Festigungsmittel) von 60-80%.

Strukturformel von Tetraethylorthosilicate

Dazu kommt ein nicht näher spezifizierten **Alkylalkoxysilan** mit CAS: 35435-21-3 (Hydrophobierungsmittel)[60] in der Menge von 2,5-5%, und **Dioctylzinndilaurat** mit CAS: 3648-18-8 (Katalysatorsystem)[61] erwähnt. Somit ist die Zusammensetzung beider ausgewählten Produkte unsicher.

[56] Gegenüber den Angaben von 2016 fehlt laut technisches Merkblatt von 2019 Octamethylcyclotetrasiloxan (≤ 0,5 %, CAS-Nr. 556-67-2) als Komponente.

[57] KSE H. Technisches Merkblatt, Produktnummer 0602, 0602 TM-3-311 08/19 EW_AMy_Jen, p. 1f. (www.remmers.de, abgerufen am 10.09.2020).

[58] Hier werden mit Sicherheit beide Komponenten – den Festigungsstoff und Hydrophobierungsstoff zusammengezählt.

[59] KSE H. Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31, Versionsnummer 4, Druckdatum: 12.06.2018, überarbeitet am: 12.06.2018, p. 2f. (www.remmers.de, abgerufen am 10.09.2020).

[60] Die CAS-Bezeichnung entspricht dabei der Bezeichnung von Hydrophobierungsmittel in dem Produkt Funcosil SNL aus dem Sicherheitsblatt aus dem Jahr 2014. Es handelt sich also um Triethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan. Diese Substanz wurde allerdings in den Messungen von Dr. Hartmann in dem Funcosil SNL nicht nachgewiesen (s. Abschlussbericht 2017, Bericht von Dr. Hartmann vom 2.11.2016, Anhang 2.4). Auch in derzeitigen Sicherheitsmerkblatt von Funcosil SNL wurde diese Chemikalie nicht genannt.

[61] Dabei ist zu bedenken, dass bei diesem Produkt gegenüber früheren Produkten auf Basis von Tetraethylsilikat möglicherweise auch das Katalysatorsystem geändert wurde: *„Bis vor kurzem wurden häufig für den Anwender stark giftige zinnorganische Katalysatoren (z.B. Zinn-dibutyl-dilaurat* [CAS: 77-58-7]*, ca. 0,2 %) oder auch sekundäre Amine eingesetzt. Derzeit wird (wegen erhöhter Umweltauflagen) intensiv an weniger giftigen Systemen geforscht“*, in: WENDLER / GRASSEGGER (2015): *Chemie der Steinfestigung mit Kieselsäureestern. Reaktionen bei Erhärtung, Anwendung und Modifizierung.* In: Natursteinbauwerke. Untersuchen - Bewerten - Instandsetzen; Arbeitsheft - Regierungspräsidium Stuttgart, Landesamt für Denkmalpflege, p. 211., p. 211

6.6.3 Versuche zum Tränkungsverhalten mit Hydrophobierungsmitteln

(Friederike Funke, Markus Rüße; LWL-DLBW)

Zur Einordung des Tränkungsverhaltens an unterschiedlichen Varietäten von Baumberger Kalksandstein wurden Prüfkörper (Oberpaol, Unterpaol, Lappen) in der Dimension ca. 11 x 11 x 45 mm gefertigt und mit folgenden Hydrophobierungsmitteln bearbeitet.

Hydrophobierungsmittel: 1. Remmers Funcosil SNL
2. Remmers KSE H

In Anlehnung an Literaturvorgaben zu Tränkungs - und Trocknungsabläufen wurde die Tränkungsversuche wie folgend vorgenommen.

Vorgehensweise:

1. Vorkonditionierung ca. 20°C, ca. 50% r.F. (Raumklima)
2. Kapillares Saugen bis zur vollständigen Tränkung (unterstützt durch Nachfüllen)
3. Tauchtränkung 2 Stunden
4. Probekörper abtupfen
5. Lagerung Zeitraum Gelbildung: 3 Tage bei ca. 20°C und ca. 70% r.F. entspricht ca. 12g/m³ absoluten Feuchte (GOTTWALD, 2016)
6. Funcosil SNL: Lagerung Trocknung/Restreaktion für weitere mind. 31 Tage bei Raumklima
7. KSE H: Lagerung Trocknung/Restreaktion für weitere mind. 31 Tage bei Raumklima
8. Weitere Tränkung
9. Teilung der Prüfkörper und optische Beurteilung der Verteilung der Hydrophobierungsmittel

Hinweis:

Durch kapillares Saugen zeigt der BKS nach 2 Stunden eine Saughöhe von ca. 4,5 cm. Die Vorversuche wurden an Prüfkörpern mit einer Saugfläche von 1,1 x 1,1 cm durchgeführt. Die jeweiligen Hydrophobierungsmittel wurden alle 30 min entsprechend der Saughöhe nachgefüllt.

Tab.44: *Übersicht der Prüfreihe nach zweifacher Tränkung an Baumberger Kalksandstein mit Funcosil SNL*

Funcosil SNL		
Prüfkörperflächen nach Teilung	**Probenbezeichnung**	**Varietät**
	P 5039-P/A	Lappen
	P 5039-S/A	Lappen
	P 5036-P/A	Unterpaol
	P 5036-S/A	Unterpaol
	P 5038-P/A	Oberpaol
	P 5038-P/A	Oberpaol

Tab.45: *Übersicht der Prüfreihe nach zweifacher Tränkung an Baumberger Kalksandstein mit KSE H*

KSE H		
Prüfkörperflächen nach Teilung	**Probenbezeichnung**	**Varietät**
	P 5032-P/A	Lappen
	P 5032-S/A	Lappen
	P 5033-P/A	Unterpaol
	P 5033-S/A	Unterpaol
	P 5038-P/A	Oberpaol
	P 5038-P/A	Oberpaol

Auswertung:
Nach der Reaktionszeit von 31 Tagen und Teilung einiger Prüfkörper, konnte keine vollständige Durchtränkung festgestellt werden. Ein vollständiges erneutes Tränken der restlichen Prüfkörper sollte zeigen, ob sich diese nachträgliche Behandlung bei verlängerter Einwirkzeit über 48 Stunden und bei vollständiger Überdeckung mit dem jeweiligen Mittel, eine Tränkung bis in den Kern zeigt. Mehrfachhydrophobierungen sind bei einigen im Projekt bearbeiteten Objekten in den Restaurierungsdokumentationen verzeichnet. Nach der zweiten Tränkung und anschließender dreiwöchiger Lagerung, fand eine zwanzigminütige Tränkung im Wasserbad statt., um hydrophile und hydrophobe Bereiche klar unterscheiden zu können. Bei allen anschließend geteilten Prüfkörpern (vergl. **Tab.44** und **Tab.45**) zeigt sich eine hydrophobe Oberfläche und ein von Wasser durchfeuchter Kern. Die mit Funcosil SNL getränkten Proben zeigen einen Tränkungshorizont, der bis 1-2 mm unterhalb der Oberfläche verläuft, wohingegen die mit KSE H getränkten Prüfkörper einen heterogenen Tränkungshorizont innerhalb des Probenquerschnitt aufweisen.

6.6.4 Vakuumtränkung von BKS-Prismen mit Hydrophobierungsmittel

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen)

Probenvorbereitung

- Prismen der Varietäten: **Oberpaol, Unterpaol und Lappen** (Prismen der Größe 1x1x5 cm)
- Hydrophobierungsmittel:
  Remmers Funcosil SNL Hydrophobierende Imprägnierung
  Remmers KSE H Steinfestiger

- Trocknung der Steinprismen vor der Tränkung bei 70°C
- Prismen in Kunststoffbecher gelegt und mit Hydrophobierungsmittel überschichtet → weiter siehe Vakuumtränkung

Abb. 102: *Vakuumpumpstand. Der Pfeil markiert die Probenklammer.*

Abb. 101*: Vakuumpumpstand. Blick in die Probenkammer. In den Styroporbecher wird ein Kunststoffbehälter mit dem Hydrophobierungsmittel und den BKS-Prismen gestellt.*

Vakuumtränkung

Funcosil SNL (09.12.2022)

- Gleichzeitiges Tränken der Varietäten **Oberpaol, Unterpaol und Lappen**
- **20 min.** zyklisches Pumpen und Belüften bis zum Ende der starken Blasenbildung → erforderlich wegen sehr starker Luftblasenbildung (Schäumen der Flüssigkeit)
- **30 min.** Evakuierung bei laufender Vakuumpumpe (gelegentlich Blasenbildung)
- **60 min.** unter Vakuum bei ausgeschalteter Pumpe (gelegentlich Blasenbildung)

Wiederholung der Tränkung mit Funcosil SNL (20.03.2023)

- Gleichzeitiges Tränken der Varietäten **Oberpaol, Unterpaol und Lappen**
- **14 min.** zyklisches Pumpen und Belüften bis zum Ende der starken Blasenbildung → erforderlich wegen sehr starker Luftblasenbildung (Schäumen der Flüssigkeit)
- **30 min**. Evakuierung bei laufender Vakuumpumpe (gelegentlich Blasenbildung)
- **135 min.** unter Vakuum bei ausgeschalteter Pumpe (gelegentlich Blasenbildung) → gleiche Zeit wie beim KSE H

KSE H (09.12.2022)

- Gleichzeitiges Tränken der Varietäten **Oberpaol, Unterpaol und Lappen**
- **3 min.** zyklisches Pumpen und Belüften bis zum Ende der starken Blasenbildung → erforderlich wegen sehr starker Luftblasenbildung (Schäumen der Flüssigkeit) → im Unterschied zum SNL ließ die starke Blasenbildung vergleichsweise schnell nach
- **30 min. Evakuierung** bei laufender Vakuumpumpe (gelegentlich Blasenbildung).
- **135 min.** unter Vakuum bei ausgeschalteter Pumpe (gelegentlich Blasenbildung).

Ergebnisse

KSE-H und SNL - Serie (09.12.2022)

- Erfolgreiche Hydrophobierung des gesamten Steinvolumens mit KSE-H
- Nur randliche Hydrophobierung mit Funcosil SNL
  → überwiegender Teil des Steinvolumens weiterhin saugend.

Wiederholung SNL (21.03.2023)

- Bestätigung der Ergebnisse vom 09.12.2022 (in etwa verdoppelte Einwirkzeit (135 statt 60 min.) führt nicht zu einer verbesserten Eindringtiefe.

6.6.5 Untersuchungen zum Einfuss der KSE H-Hydrophobierung auf ausgewählte physiko-mechanische Eigenschaften von Baumberger Kalksandstein

(Peter Kozub, Alina Bußmann, Filip Kozik, Jana Lea-Marie Kraus, Quint Thibault Schulz; CICS Köln)

Einführung

Der vorliegende Bericht beschreibt das Untersuchungsprogramm zur Bestimmung einiger physiko-mechanischer Eigenschaften des Baumberger Kalksandsteins vor und nach der Hydrophobierung. Es wurden drei Varianten des frischen Gesteinsmaterials aus um Münster liegenden Steinbrüchen untersucht: Unterpaol, Oberpaol und Lappen. Für die Hydrophobierung der Proben wurde das Produkt KSE H[62] verwendet.

Probenmaterial

Das Probenmaterial wurde aus bruchfrischen und zugesägten Steinquadern des Baumberger Kalksandsteins mit den Maßen 25 x 35 x 15,5 cm entnommen (**Abb. 109**). Aus diesen Steinquadern wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 cm bzw. 3 cm und einer Länge von ca. 15 cm (senkrecht zur Schichtung) und 25 cm (parallel zur Schichtung) entnommen, wie in Abbildung 7 dargestellt.[63]
Die Bohrkerne wurden dann in Probestücke von 5 cm, 10 cm und 0,5 cm Länge zugesägt. Nachdem das Sägemehl von der Oberfläche der Proben unter fließendem Wasser entfernt worden war, wurden die Proben bei Raumtemperatur getrocknet und schließlich bei einer Temperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % im Klimaschrank bis zur Massenkonstanz klimatisiert.
Für bestimmte Untersuchungen (Rohdichte, kapillare Wasseraufnahme, offene Porosität und Wasseraufnahmekoeffizient) wurden die Proben nach der Messung in unbehandeltem Zustand erneut in der beschriebenen Weise getrocknet und klimatisiert. Erst nach Erreichen der Massenkonstanz wurden sie kapillar mit einem Hydrophobierungsmittel getränkt. Die Menge an Flüssigkeit wurde kontinuierlich erhöht, bis der sichtbare Tränkungshorizont über den Flüssigkeitsstand gestiegen war. Nach vollständiger Tränkung wurden die Proben mit der Tränkungsflüssigkeit bedeckt und für weitere 2 Stunden in einem abgeschlossenen Behälter belassen. Anschließend wurden die Proben für 48 Stunden bei Raumbedingungen (ca. 20°C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit) auf einem Gitter gelagert.

[62] KSE H ist ein Hydrophobierungsmittel und Festiger der Firma Remmers. Als Hauptbestandteil wird ein Tetraethylsilikat genannt. Darüber hinaus enthält es einen nicht näher spezifizierten Alkylalkoxysilan und Dioctylzinndilaurat als Katalysator. Weitere Informationen zu diesem Produkt finden sich in den "Ausgewählten Hydrophobierungsmitteln.
[63] Die Lokalisierung der Proben in Steinquadern siehe Abb. 1-6.

Lappen

***Abb. 103**: Lokalisierung der Bohrkerne Lappen ⊥.*

***Abb. 104**: Lokalisierung der Bohrkerne Lappen II.*

Oberpaol

***Abb. 105:** Lokalisierung der Bohrkerne Oberpaol ⊥.*

***Abb. 106:** Lokalisierung der Bohrkerne Oberpaol II.*

Unterpaol

***Abb. 107:** Lokalisierung der Bohrkerne Unterpaol ⊥*

***Abb. 108:** Lokalisierung der Bohrkerne Unterpaol II.*

Untersuchungsmethoden

Es wurden ausgewählte Eigenschaften des unbehandelten Baumberger Kalksandsteins sowohl vor als auch nach der Hydrophobierung untersucht. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben kurz die einzelnen Methoden und präsentieren dann die Ergebnisse der Messungen in tabellarischer Form.

Abb. 109: *BKS-Steinquader mit Bohrlöchern der entnommenen Proben.*

Untersuchungsergebnisse

Rohdichte

Die Rohdichte (ρ_{roh}) eines Stoffes bezeichnet die Trockenmasse (m_{tr}) bezogen auf das Volumen (V) eines Festkörpers einschließlich der Porenräume. Sie wird in der vorliegenden Studie in g/cm³ angegeben. Zur Bestimmung der Rohdichte wurden Probekörper mit einem Durchmesser und einer Länge von jeweils 5 cm verwendet. Die Bohrkernstücke wurden zunächst bis zur Massenkonstanz getrocknet und gewogen (m_{tr}). Anschließend wurden sie kapillar mit Wasser getränkt und für weitere 2 Stunden in einem verschlossenen Behälter mit einem Überschuss von etwa 2 cm Wasser belassen. Nach dem Herausnehmen aus dem Behälter wurde die Oberfläche der Proben mit einem nassen Tuch abgetupft und erneut gewogen ($m_{naß}$). Schließlich wurden die Proben im Wasser gewogen (m_{Fl}). Das Volumen der Proben wurde gemäß der folgenden Formel berechnet:

$$V_{Auf} = \frac{m_{naß} - m_{Fl}}{\rho_{Fl}} \tag{6.6.1}$$

Die Rohdichte der Proben wurde gemäß der folgenden Formel berechnet:

$$\rho_{roh} = \frac{m_{tr}}{V_{Auf}} \tag{6.6.2}$$

In der **Tab.46** sind die Ergebnisse der Messungen der Rohdichte zusammengefasst.

<u>Auswertung</u>

Es wurden bereits bei den nicht behandelten Proben Unterschiede in der Rohdichte zwischen den verschiedenen Varietäten festgestellt. Die höchste Rohdichte wurde bei der Varietät Lappen mit 2,15 g/cm³ gemessen, während die Rohdichte der Varietät Oberpaol mit 2,05 g/cm³ knapp darunterlag. Unterpaol wies mit 1,96 g/cm³ die niedrigste Rohdichte auf.

Nach der Behandlung mit Hydrophobierungsmittel stiegen die Werte bei allen Varietäten um 0,4 bis 0,6 g/cm³ an. Besonders stark stieg die Rohdichte der Varietät Oberpaol an, die nach der Behandlung eine Rohdichte von 2,67 g/cm³ aufwies. Die geringste Erhöhung wurde bei der Varietät Unterpaol festgestellt, die nach der Behandlung eine Rohdichte von 2,15 g/cm³ zeigt.

***Tab.46**: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der Rohdichte.*

Testreihe			Ergebnisse (Rohdichte)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [g/cm³]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [g/cm³]**	**Standard-abweichung *s* [g/cm³]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**2,05**	10	0,002	0,05	0,023
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**1,96**	10	0,002	0,05	0,023
		⊥					
	Lappen	**II**	**2,15**	10	0,001	0,04	0,017
		⊥					
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**2,67**	10	0,008	0,09	0,033
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**2,15**	10	0,003	0,05	0,25
		⊥					
	Lappen	**II**	**2,55**	10	0,003	0,05	0,021
		⊥					

Massebezogene Wasseraufnahme (unter Atmosphärendruck)

In der vorliegenden Studie wird die massebezogene Wasseraufnahme (Wm) als die Differenz zwischen der Masse einer Probe nach der Sättigung mit Wasser (mnaß) und ihrer Trockenmasse (mtr), bezogen auf die Trockenmasse (mtr) der Probe definiert und in Prozent angegeben. Die Bestimmung der massebezogenen Wasseraufnahme erfolgte unter Verwendung derselben Probekörper wie bei der Messung der Rohdichte.

Die massebezogene Wasseraufnahme der Proben wurde gemäß der folgenden Formel berechnet:

$$W_{m(\%)} = \frac{m_{naß} - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100 \qquad (6.6.3)$$

In der **Tab. 47** sind die Ergebnisse der Messungen der massebezogenen Wasseraufnahme zusammengefasst.

Tab. 47: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der massebezogen Wasseraufnahme.*

Testreihe			Ergebnisse (massebezogene Wasseraufnahme)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [%]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [%]**	**Standard-abweichung *s* [%]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**8,22**	10	0,674	0,82	0,1
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**11,49**	10	0,861	0,93	0,081
		⊥					
	Lappen	**II**	**6,80**	10	0,307	0,55	0,081
		⊥					
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**1,60**	10	0,021	0,14	0,090
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**1,68**	10	0,031	0,18	0,106
		⊥					
	Lappen	**II**	**1,27**	10	0,011	0,10	0,081
		⊥					

<u>Auswertung</u>
Es gibt signifikante Unterschiede in Bezug auf die kapillare Wasseraufnahme (bezogen auf die Masse) der Proben vor der Behandlung, abhängig von der jeweiligen Varietät. Die Varietät Lappen weist eine Wasseraufnahme von lediglich 6,8 % auf, während Unterpaol eine Wasseraufnahme von 11,49 % aufweist. Oberpaol liegt mit einem Wert von 8,22 % zwischen den anderen Varietäten.
Nach der Behandlung mit KSE H nehmen alle Proben nur noch geringe Mengen an Wasser auf. Die Varietät Unterpaol hat trotz der Hydrophobierung immer noch die höchste Wasseraufnahme von 1,68 %. Bei Oberpaol beträgt diese 1,6 % und bei Lappen 1,27 %.

Volumenbezogene Wasseraufnahme (unter Atmosphärendruck)
In der vorliegenden Studie wird die volumenbezogene Wasseraufnahme als die Differenz zwischen der Masse einer Probe nach der Sättigung mit Wasser ($m_{naß}$) und ihrer Trockenmasse (m_{tr}), bezogen auf das Volumen der Probe (V) definiert und in Prozent angegeben.

Die Bestimmung der volumenbezogenen Wasseraufnahme bzw. der offenen Porosität erfolgte unter Verwendung derselben Probekörper wie bei den vorherigen Messungen.
Die volumenbezogene Wasseraufnahme der Proben wurden gemäß der folgenden Formel berechnet:

$$W_{v(\%)} = \frac{m_{naß} - m_{tr}}{V \cdot \rho_{Fl}} \cdot 100 \qquad (6.6.4)$$

In der **Tab. 48** sind die Ergebnisse der Messungen der volumenbezogenen Wasseraufnahme zusammengefasst.

Tab. 48: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der volumenbezogen Wasseraufnahme bzw. offenen Porosität*

Testreihe			Ergebnisse (volumenbezogene Wasseraufnahme)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [Vol. %]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [Vol. %]**	**Standard-abweichung *s* [Vol. %]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**16,80**	10	1,603	1,27	0,075
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**22,56**	10	1,831	1,35	0,060
		⊥					
	Lappen	**II**	**14,62**	10	0,898	0,95	0,065
		⊥					
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**4,28**	10	0,118	0,34	0,080
		⊥					
	Unterpaol	**II**	**3,61**	10	0,156	0,40	0,109
		⊥					
	Lappen	**II**	**3,23**	10	0,066	0,26	0,080
		⊥					

<u>Auswertung</u>

Die Ergebnisse der Messungen belegen eine deutliche Veränderung der volumenbezogenen Wasseraufnahme vor und nach der Behandlung. Vor der Tränkung hatte Unterpaol den höchsten Wert von 22,56 Vol.-%, gefolgt von Oberpaol mit 16,8 Vol.-%. Die Varietät Lappen wies den niedrigsten Wert von 14,62 Vol.-% auf.

Nach der Tränkung wurden bei allen Varietäten deutlich geringere Werte festgestellt, die unter 5 Vol.-% lagen. Oberpaol hatte einen Wert von 4,28 Vol.-%, Unterpaol 3,61 Vol.-% und Lappen 3,23 Vol.-%. Diese starke Veränderung ist vermutlich auf die hydrophoben Effekte zurückzuführen und nicht mit einer Veränderung der offenen Porosität gleichzusetzen.

Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w). beschreibt, wieviel Wasser (m) eine definierte Fläche eines Materials (A) in einer bestimmten Zeitspanne (t) durch kapillare oder absorptive Kräfte aufgenommen wird.
Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte unter Verwendung derselben Probekörper wie bei den vorherigen Messungen.

Tab. 49: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des Wasseraufnahmekoeffizients (w-Wert).*

Testreihe			Ergebnisse (Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert))				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [kg/m²·h^0,5]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [kg/m²·h^0,5]**	**Standard-abweichung *s* [kg/m²·h^0,5]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**2,50**	5	0,034	0,186	0,074
		⊥	**2,40**	5	0,291	0,539	0,224
	Unterpaol	**II**	**3,76**	5	0,031	0,175	0,047
		⊥	**3,06**	5	0,003	0,053	0,017
	Lappen	**II**	**1,94**	5	0,007	0,084	0,043
		⊥	**1,83**	5	0,030	0,173	0,094
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**0,08**	5	0,001	0,031	0,395
		⊥	**0,18**	5	0,0003	0,016	0,086
	Unterpaol	**II**	**0,12**	5	0,005	0,070	0,575
		⊥	**0,09**	5	0,001	0,023	0,268
	Lappen	**II**	**0,14**	5	0,006	0,078	0,577
		⊥	**0,05**	5	0,0001	0,009	0,193

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) der Proben wurden gemäß der folgenden Formel berechnet:

(6.6.5)

$$w = \frac{m}{A * \sqrt{t}}$$

In der **Tab. 49** sind die Ergebnisse der Messungen des Wasseraufnahmekoeffizients (w-Wert) zusammengefasst.

Auswertung

Vor der Festigung wiesen die Werte für Oberpaol parallel zur Schichtung eine Wasseraufnahme von 2,50 kg/m²√h und senkrecht zur Schichtung von 2,40 kg/m²√h auf. Unterpaol zeigte die höchste Wasseraufnahme - parallel zur Schichtung mit 3,76 kg/m²√h und senkrecht zur Schichtung mit 3,06 kg/m²√h. Die Varietät Lappen hatte die niedrigsten Wasseraufnahme von 1,94 kg/m²√h parallel zur Schichtung und 1,83 kg/m²√h senkrecht zur Schichtung. Es ist zu beobachten, dass alle Varietäten mit Schichtung einen höheren w-Wert aufweisen und somit stark saugend sind (SNETHLAGE & PFANNER 2020, S. 253).

Nach der Festigung liegen die w-Werte innerhalb einer Spanne von 0,05 kg/m²√h und 0,18 kg/m²√h. Gemäß SNETHLAGE sind Gesteine mit w-Werten unterhalb von 0,1 kg/m²√h nur gering saugend. [64]

Biaxiale Biegezugfestigkeit

Als biaxiale Biegezugfestigkeit wird die erreichte maximale Biegespannung definiert, die an Scheiben durch eine ringförmig eingeleitete Last erzeugt wird. Die Gesteins-Kreisplatte liegt dabei auf einem größeren Ring und wird zentrisch über einen zweiten, kleineren Ring belastet. (**Abb. 110 Abb. 111**) Die Biegezugfestigkeit wird aus dem ersten Maximum der Spannungs-/Durchbiegungslinie ermittelt.

.

$2a$: *Radius des unterlagernden Belastungsrings*
$2b$: *Radius des auflagernden Belastungsrings*
$2R$: *Radius der Kreisplatte*
F: *Einzellast*
h: *Plattendicke*
$f_{(0)}$: *Biegung in der Plattenmitte*
w: *Biegung der Platte in dem Belastungspunkt*

Abb. 110: *Schematische Darstellung der biaxialen Biegezugfestigkeitsprüfung*

Zur Bestimmung der biaxialen Biegezugfestigkeit wurden Gesteinsscheiben des Baumberger Kalksteins mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Höhe von 5 mm als Prüfkörper verwendet. Diese Scheiben wurden aus Bohrkernen mit einer Länge von ca. 15 cm bzw. 25 cm geschnitten. Die Probekörper wurden aus jeder der drei Varietäten sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung des Gesteins geschnitten. Ein Teil der Prüfkörper wurde unbehandelt belassen, während der andere Teil mit KSE-H getränkt wurde, wie im Abschnitt "Probematerial" beschrieben.

[64] Ibid.

Tab. 50: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der biaxialen Biegezugfestigkeit.*

Testreihe			Ergebnisse (biaxiale Biegezugfestigkeit)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [MPa]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [MPa]**	**Standard-abweichung *s* [MPa]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**9,49**	5	0,426	0,653	0,069
		⊥	**10,16**	5	0,017	0,130	0,013
	Unterpaol	**II**	**7,07**	5	0,398	0,631	0,089
		⊥	**7,73**	5	0,100	0,316	0,041
	Lappen	**II**	**9,78**	5	1,340	1,158	0,118
		⊥	**7,78**	5	0,571	0,756	0,097
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**14,36**	5	2,683	1,638	0,114
		⊥	**12,95**	5	7,039	2,653	0,205
	Unterpaol	**II**	**10,83**	5	1,762	1,327	0,123
		⊥	**11,60**	5	1,580	1,257	0,108
	Lappen	**II**	**14,79**	5	5,587	2,364	0,160
		⊥	**13,98**	5	0,799	0,894	0,064

Für die Messung biaxialen Biegezugfestigkeit wurde die Prüfmaschine "Zwick/Roell Z010" der TH Köln verwendet.
Die biaxiale Biegezugfestigkeit wurde an fünf Gesteinsscheiben pro Varietät (Lappen, Oberpaol und Unterpaol) und pro Richtung (parallel oder senkrecht zur Schichtung) gemessen. Die Messungen wurden sowohl an unbehandelten als auch an hydrophobierten Probekörpern durchgeführt. Vor der Messung wurden die Proben zentriert in die Prüfmimik eingelegt. Anschließend wurde ein konstant steigender Anpressdruck angewendet, bis die maximale Biegespannung des Materials erreicht wurde.
Die Prüfmaschine wurde mit den folgenden voreingestellten Parametern betrieben:

- Vorkraft: 5N
- Prüfgeschwindigkeit: 1 mm/min

Für jeden Prüfkörper wurden die genauen Maße des Durchmessers und der Höhe der Gesteinsscheibe erfasst und in der Software eingegeben.

***Abb. 111**: Vorrichtung zur Durchführung der biaxialen Biegezugfestigkeit.*

Die biaxiale Biegezugfestigkeit wird wie folgt berechnet (WITTMANN & PRIM,1985, p. 789).

$$\sigma_{BZ} = \frac{3F}{4\pi h^2}\left[2(1+\nu)\ln\frac{a}{b} + (1-\nu)\frac{a^2-b^2}{R^2}\right] \tag{6.6.6}$$

Die Zusammenfassung der Messergebnisse der biaxialen Biegezugfestigkeit findet sich in **Tab. 50.** Um die biaxiale Biegezugfestigkeit zu bestimmen, wird das erste Maximum der Spannungs-Dehnungs-Kurve herangezogen. Diese Kurve entsteht durch die Anwendung einer statischen Kraft und zeigt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung in einem Koordinatensystem. Die Ergebnisse der Messungen für jede Testreihe werden in separaten Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt. Da die Messungen an unbehandelten und hydrophobierten Proben durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse zunächst für unbehandelte Proben und dann für hydrophobierte Proben präsentiert.

Vor der Hydrophobierung

***Abb. 112**: Messergebnis UP senkrecht, unbehandelt*

***Abb. 113:** Messergebnis UP parallel, unbehandelt*

Die biaxiale Biegezugfestigkeit beim Unterpaol senkrecht zur Schichtung (**Abb. 112**) liegt zwischen 7,44 MPa und 8,10 MPa (arithmetisches Mittel: 7,07 MPa). Alle fünf Messungen zeigen eine sehr ähnliche Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Messung parallel zur Schichtung (**Abb. 113**) sind die Werte im Durchschnitt ein wenig höher (arithmetisches Mittel: 7,73 MPa) liegen aber in einem breiteren Bereich zwischen 6,46 MPa und 8,09 MPa. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve zeigt auch eine größere Streuung.

Abb. 114: *Messergebnis OP senkrecht, unbehandelt*

Abb. 115: *Messergebnis OP parallel, unbehandelt*

Gemäß **Abb. 114** weisen die Messergebnisse für den Oberpaol senkrecht zur Schichtung eine höhere biaxiale Biegezugfestigkeit auf als der Unterpaol. Die festgestellten Werte liegen zwischen 10,04 MPa und 10,35 MPa, wobei das arithmetische Mittel bei 10,16 MPa liegt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve zeigt bei allen fünf Messungen einen ähnlichen Verlauf.
Im Gegensatz dazu sind die Messwerte für den Oberpaol parallel zur Schichtung (**Abb. 115**) im Durchschnitt etwas niedriger, wobei das arithmetische Mittel bei 9,49 MPa liegt. Die gemessenen Werte liegen in einem engeren Bereich zwischen 8,5 MPa und 10,32 MPa. Auch hier zeigen alle fünf Messungen eine ähnliche Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Abb. 116: *Messergebnis L senkrecht, unbehandelt*

Abb. 117: *Messergebnis L parallel, unbehandelt*

In **Abb. 116** sind die Messergebnisse der biaxialen Biegezugfestigkeit der Varietät Lappen dargestellt. Senkrecht zur Schichtung liegen die Werte zwischen 7,09 MPa und 8,91 MPa (arithmetische Mittel bei 7,78 MPa).
Im Gegensatz dazu, anders als bei den anderen Varietäten, zeigen sich parallel zur Schichtung (**Abb. 117**) deutlich höhere Werte, die von 8 MPa bis 11,02 MPa reichen (arithmetische Mittel bei 9,78 MPa). Im Vergleich zu den anderen Varietäten scheint die Streuung der Messergebnisse für Lappen sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung größer zu sein.

Nach der Hydrophobierung

***Abb. 118**: Messergebnis UP senkrecht, KSE*

***Abb. 119**: Messergebnis UP parallel, KSE*

Insgesamt zeigen die hydrophobierten Proben höhere Werte der biaxialen Biegezugfestigkeit. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei der Variante Lappen, die senkrecht zur Schichtung verläuft, zu erkennen. Hier ergaben sich im Durchschnitt eine Steigerung um 6,2 MPa im Vergleich zu Oberpaol, das ebenfalls senkrecht zur Schichtung verläuft. Die geringste Steigerung der Biegezugfestigkeit wurde bei Oberpaol beobachtet, mit einer durchschnittlichen Erhöhung von 2,79 MPa.

In **Abb. 118** ist zu sehen, dass die biaxiale Biegezugfestigkeit bei hydrophobiertem Probematerial des Unterpaols, das senkrecht zur Schichtung verläuft, Werte zwischen 10,26 MPa und 13,55 MPa aufweist. Das arithmetische Mittel liegt hierbei bei 11,6 MPa. Allerdings zeigen die Werte der einzelnen Proben einen hohen Variationskoeffizienten (VarK: 0,108).

Im Gegensatz dazu liegen die Werte bei der Messung parallel zur Schichtung in **Abb. 119** im Durchschnitt etwas niedriger, nämlich bei einem arithmetischen Mittel von 10,83 MPa. Allerdings bewegen sich die Werte hier in einem ähnlichen Bereich von 9,15 MPa bis 12,26 MPa. Im Vergleich zur Messung senkrecht zur Schichtung liegt der Variationskoeffizient sogar noch höher (VarK: 0,123).

***Abb. 120**: Messergebnis OP senkrecht, KSE*

***Abb. 121**: Messergebnis OP parallel, KSE*

Gemäß **Abb. 120** beträgt die biaxiale Biegezugfestigkeit senkrecht zur Schichtung zwischen 10,45 MPa und 13,59 MPa, wobei das arithmetische Mittel bei 12,95 MPa liegt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Werte eine deutliche Streuung aufweisen, was durch einen Varianzkoeffizient von 0,205 bestätigt wird

Im Gegensatz dazu sind die Werte der biaxialen Biegezugfestigkeit in **Abb. 121** parallel zur Schichtung höher, wobei der arithmetische Mittelwert bei 14,36 MPa liegt. Die Messungen zeigen Werte zwischen 12,68 MPa und 16,35 MPa, wobei auch hier eine Streuung der Werte zu beobachten ist. Die Streuung fällt jedoch geringer aus als bei den Messungen senkrecht zur Schichtung, was durch einen Varianzkoeffizienten von 0,114 bestätigt wird.

***Abb. 122**: Messergebnis L senkrecht, KSE*

***Abb. 123**: Messergebnis L parallel, KSE*

Gemäß **Abb. 122** liegt die biaxiale Biegezugfestigkeit beim Lappen senkrecht zur Schichtung zwischen 12,82 MPa und 15,12 MPa. Der Durchschnittswert beträgt 14,79 MPa. Allerdings weichen zwei der fünf Messungen stark von den anderen ab, was zu einer relativ hohen Streuung der Werte führt (VarK: 0,160). Die restlichen Kurven sind eng beieinander und zeigen eine geringe Abweichung.
In **Abb. 123** sind die Werte der biaxialen Biegezugfestigkeit parallel zur Schichtung dargestellt. Hier sind die Werte nur geringfügig kleiner, mit einem arithmetischen Mittel von 13,98 MPa. Die Werte variieren zwischen 11,29 MPa und 17,61 MPa, zeigen jedoch nur eine geringe Streuung der Messungen (VarK: 0,064), da die Kurven nahe beieinanderliegen.

<u>Auswertung</u>
Vor der Hydrophobierung zeichneten sich alle Probekörper der verschiedenen Varietäten durch eine geringe Streuung der Werte aus, sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung (siehe **Tab. 50** und **Abb. 112**). Die Graphen der Messreihen lagen eng beieinander, und bei Erreichen der maximalen Biegespannung zeigte sich ein klarer Bruch. Dies deutet darauf hin, dass das Material im unbehandelten Zustand relativ homogen war, unabhängig von der Varietät und der Richtung. Lediglich in der Varietät Lappen zeigt sich, dass die Streuung hoch ist (VarK: parallel zur Schichtung 0,118, senkrecht zur Schichtung 0,097). Im unbehandelten Zustand zeigte der Unterpaol die niedrigsten Werte, die in beiden Richtungen relativ ähnlich waren (parallel zur Schichtung 7,07 MPa, senkrecht zur Schichtung 7,73 MPa). Der unbehandelte Oberpaol hingegen zeigte die höchsten Werte, aber auch hier waren die Richtungsunterschiede gering (parallel zur Schichtung 9,49 MPa, senkrecht zur Schichtung 10,16 MPa). Bei beiden Varietäten lagen die Werte senkrecht zur Schichtung höher. Der Lappen verhielt sich jedoch anders. Die Varietät zeigte parallel zur Schichtung höhere Werte (9,78 MPa) als senkrecht zur Schichtung (7,78 MPa). Diese Unterschiede waren auch signifikant.
Nach der Hydrophobierung war eine deutlich höhere Streuung der Messungen innerhalb der jeweiligen Testreihen zu sehen (siehe **Tab. 50** und **Abb. 118 – Abb. 123**). Dies galt für alle drei Varietäten, sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung. Bei allen drei Varietäten und in beiden Richtungen war ein deutlicher Anstieg der Werte der biaxialen Biegezugspannung zu beobachten.
Die Streuung nach der Hydrophobierung konnte durch einen leicht abweichenden Grad der Hydrophobierung erklärt werden. Alle Proben zeigten nach der Hydrophobierung einen deutlichen Anstieg der biaxialen Biegezugfestigkeit.

Statischer E-Modul (aus der biaxialen Biegezugfestigkeit)

In der vorliegenden Studie wird der Elastizitätsmodul (E-Modul) aus dem Proportionalitätsbereich der Spannungs-Dehnungs-Linie der biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung ermittelt. Das Elastizitätsmodul ist definiert als die ideelle Spannung, die erforderlich wäre, um das betrachtete Material um die Dehnung ε = 1 = 100 % zu dehnen und somit dessen Länge zu verdoppeln.

Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls erfolgte unter Verwendung derselben Probekörper wie bei der vorherigen Messung.

Der statische Elastizitätsmodul der Proben wurde gemäß der folgenden Formel berechnet (KOZUB, 2008, S. 410) :

$$E = \frac{3F}{2\pi w h^3}(1-\nu^2)\left[(a^2-b^2)\left(1+\frac{(1-\nu)(a^2-b^2)}{2(1+\nu)R^2}\right)+2b^2\ln\frac{b}{a}\right] \tag{6.6.7}$$

Die Ergebnisse der Messungen des statischen E-Moduls sind In der **Tab. 51** zusammengefasst.

<u>Auswertung</u>

Vor der Hydrophobierung zeigten alle Varietäten bei paralleler Ausrichtung höhere Werte des statischen E-Moduls als bei der Messung senkrecht zu Schichtung. Insbesondere wies die Varietät Lappen mit Schichtung die höchsten Werte auf, mit einem arithmetischen Mittel von 4,21 GPa und einer relativ starken Streuung (Variationskoeffizient von 0,110). Die stärkste Streuung (Variationskoeffizient von 0,120) zeigt allerdings die Varietät Unterpaol paraller zu Schichtung. Im Gegensatz dazu waren die niedrigsten Werte des statischen E-Moduls bei der Varietät Lappen senkrecht zur Schichtung zu verzeichnen, mit einem arithmetischen Mittel von 2,61 GPa und einer relativ niedrigen Streuung (Variationskoeffizient von 0,084). Die geringsten Abweichungen mit einem Variationskoeffizienten von 0,065 zeigt die Varietät Oberpaol bei paralleler Ausrichtung.

Nach der Hydrophobierung wurden bei allen Varietäten und Ausrichtungen deutliche Erhöhungen der Werte beobachtet. Wiederum waren die Werte bei paralleler Ausrichtung am höchsten. Die Varietät Lappen senkrecht zur Schichtung erfuhr die stärkste Erhöhung um 3,06 GPa, während die niedrigste Erhöhung von 1,05 GPa bei Oberpaol ebenfalls senkrecht zur Schichtung zu beobachten ist. Die höchsten Werte wurden bei der Varietät Lappen parallel zur Schichtung mit einem Wert von 6,19 GPa verzeichnet. Die niedrigsten Werte von 4,01 GPa wurden bei Unterpaol senkrecht zur Schichtung beobachtet. Die Streuung der Werte war sehr unterschiedlich und die Varietät Oberpaol bei senkrechter Ausrichtung zur Schichtung wies die höchste Streuung mit einem Variationskoeffizienten von 0,215 auf. Die geringste Streuung nach der Hydrophobierung zeigte die gleiche Varietät bei paralleler Ausrichtung zur Schichtung mit einem Variationskoeffizienten von 0,054.

Tab. 51: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des statischen E-Moduls.*

Testreihe			Ergebnisse (statischer E-Modul)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [GPa]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [GPa]**	**Standard-abweichung *s* [GPa]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**4,11**	5	0,072	0,267	0,065
		⊥	**3,99**	5	0,072	0,269	0,067
	Unterpaol	**II**	**3,00**	5	0,129	0,359	0,120
		⊥	**2,94**	5	0,046	0,215	0,073
	Lappen	**II**	**4,21**	5	0,214	0,463	0,110
		⊥	**2,61**	5	0,048	0,219	0,084
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**6,15**	5	0,110	0,332	0,054
		⊥	**5,04**	5	1,171	1,082	0,215
	Unterpaol	**II**	**4,43**	5	0,065	0,255	0,058
		⊥	**4,01**	5	0,144	0,380	0,095
	Lappen	**II**	**6,19**	5	0,337	0,581	0,094
		⊥	**5,67**	5	0,177	0,421	0,074

Ultraschallgeschwindigkeit

Bei den Messungen der Ultraschalllaufgeschwindigkeit wurde die Laufzeit (t) der Longitudinalwelle p als Ankunftszeit des Signaleinsatzes nach einem Ultraschallimpuls ausgewertet. Die Messung wurde in Form einer Transmissionsmessung durchgeführt. Die Schallgeschwindigkeit (V_p) wurde durch die folgende Gleichung berechnet:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{dyn} \cdot (1-\mu)}{\rho_{roh} \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \tag{6.6.8}$$

Zur Durchführung der Ultraschallgeschwindigkeitsmessung kam die Ultraschall-Messvorrichtung der TH Köln zum Einsatz.[65] Als Proben dienten Bohrkerne mit einem Durchmesser von ca. 5 cm und einer Länge von ca. 10 cm.

[65] Ultraschall-Generator CONSONIC C2-GS; Prüfkopfpaar mit Tastspitzen UP-T; Software LightHouse UMPC.

Abb. 124: *Eingespannte Probe bei der Ultraschallmessung.*

Für jede Varietät wurden Messungen an sechs Bohrkernen durchgeführt, davon jeweils drei mit und drei gegen die Schichtung. An jedem Bohrkern wurden drei Messungen vorgenommen[66]. Diese Messungen wurden im Anschluss nach der Hydrophobierung an den gleichen Bohrkernen durchgeführt.
Die Ergebnisse der Messungen der Ultraschalllaufgeschwindigkeit sind In der **Tab. 52** zusammengefasst.

Auswertung

Die Beobachtungen, die während der Messung der Ultraschalllaufgeschwindigkeit gemacht wurden, bestätigen zum größten Teil die Ergebnisse der Messung der biaxialen Biegezugfestigkeit.
Vor und nach der Hydrophobierung wiesen alle Varietäten höhere Werte der Ultraschallgeschwindigkeit auf, wenn sie parallel zur Schichtung ausgerichtet waren, im Vergleich zur Messung senkrecht zur Schichtung. Der Unterpaol zeigte auch in diesem Fall die niedrigsten Werte im unbehandelten Zustand, ähnlich wie bei der biaxialen Biegezugfestigkeit, wobei die Werte in beiden Richtungen relativ ähnlich sind (parallel zur Schichtung 2,922 km/s, senkrecht zur Schichtung 2,777 km/s MPa). Der unbehandelte Oberpaol zeigte auch hier die höchsten Werte, wobei die Unterschiede in den Richtungen relativ gering waren (parallel zur Schichtung 3,381 km/s, senkrecht zur Schichtung 2,798 km/s). Die Lappen-Varietät verhielt sich bei dieser Messung anders, wobei sie zwar auch höhere Werte parallel zur Schichtung aufwies (3,377 km/s) als senkrecht zur Schichtung (2,941 km/s), jedoch sind diese Unterschiede deutlicher als bei der biaxialen Biegezugfestigkeit. Die Streuung bei allen Proben war aufgrund der Messmethoden sehr gering, mit Variationskoeffizienten im Bereich von 0,003 bis höchstens 0,033.
Ähnlich wie bei der biaxialen Biegezugfestigkeit zeigten alle Proben nach der Hydrophobierung einen deutlichen Anstieg der Werte. Dabei glichen sich die Werte aus und lagen in einem relativ engen Bereich zwischen 3,233 km/s und 3,735 km/s. Die niedrigsten Werte nach der Behandlung zeigte der Unterpaol bei der Messung senkrecht zur Schichtung mit dem Wert 3,233 km/s. Die höchsten Werte wurden der Varietät Oberpaol parallel zur Schichtung mit einem Durchschnittswert von 3,735 km/s gemessen.

[66] Die drei Messpunkte wurden jeweils beim US-Geber und US-Empfänger zuvor markiert.

Tab. 52: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der Ultraschalllaufgeschwindigkeit.*

Testreihe			Ergebnisse (Ultraschalllaufgeschwindigkeit)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [km/s]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [km/s]**	**Standard-abweichung *s* [km/s]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**3,381**	3	0,001	0,032	0,009
		⊥	**2,798**	3	0,0001	0,010	0,003
	Unterpaol	**II**	**2,922**	3	0,0001	0,009	0,003
		⊥	**2,777**	3	0,00004	0,006	0,002
	Lappen	**II**	**3,377**	2	0,0002	0,015	0,004
		⊥	**2,941**	3	0,009	0,096	0,033
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**3,735**	3	0,007	0,084	0,023
		⊥	**3,339**	3	0,003	0,054	0,016
	Unterpaol	**II**	**3,347**	3	0,0004	0,021	0,006
		⊥	**3,233**	3	0,009	0,097	0,030
	Lappen	**II**	**3,861**	3	0,001	0,030	0,008
		⊥	**3,503**	3	0,001	0,035	0,010

Dynamischer E-Modul (aus der Ultraschalllaufgeschwindigkeit)

Da die Wellenausbreitung einer Deformation des Ausbreitungsmediums gleichkommt, bestimmt sich die Schallgeschwindigkeit *v* aus den elastischen Eigenschaften dieses Mediums. Der dynamische E-Modul wurde aus der Messung der Dehnwellengeschwindigkeit ermittelt. Dabei gilt:

$$V_D = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho_{roh}}} \tag{6.6.9}$$

Tab. 53: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des dynamischen E-Moduls.*

Testreihe			Ergebnisse (dynamischer E-Modul)				
Behandlung	**Varietät**	**Ausrichtung**	**arithm. Mittelwert $\bar{x}$ [GPa]**	**Proben-menge *n* [-]**	**Varianz *v* [GPa**	**Standard-abweichung *s* [GPa]**	**Variations-koeffizient *VarK* [-]**
unbehandelt	**Oberpaol**	**II**	**19,43**	3	0,040	0,200	0,010
		⊥	**12,78**	3	0,0002	0,014	0,001
	Unterpaol	**II**	**13,62**	3	0,010	0,100	0,007
		⊥	**12,16**	3	0,005	0,073	0,006
	Lappen	**II**	**21,83**	3	0,001	0,025	0,001
		⊥	**14,89**	3	0,012	0,110	0,007
hydrophobiert	**Oberpaol**	**II**	**25,84**	3	0,001	0,030	0,001
		⊥	**20,17**	3	0,001	0,024	0,001
	Unterpaol	**II**	**19,73**	3	0,365	0,604	0,031
		⊥	**18,61**	3	0,022	0,147	0,008
	Lappen	**II**	**29,42**	3	0,016	0,128	0,004
		⊥	**23,54**	3	0,0005	0,022	0,001

Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls erfolgte unter Verwendung derselben Probekörper wie bei der vorherigen Messung.
Die Ergebnisse der Messungen des dynamischen Elastizitätsmoduls sind In der **Tab. 53** zusammengefasst.

<u>Auswertung</u>

Alle Varietäten zeigten vor der Hydrophobierung höhere Werte des dynamischen E-Moduls bei paralleler Ausrichtung im Vergleich zur Messung senkrecht zur Schichtung, ähnlich wie beim statischen E-Modul. Die Varietät Lappen bei der Messung mit der Schichtung zeigte dabei die höchsten Werte mit einem arithmetischen Mittel von 21,83 GPa. Die Varietät Unterpaol wies hingegen bei der Messung senkrecht zur Schichtung die niedrigsten Werte des dynamischen E-Moduls auf mit einem arithmetischen Mittel von 12,16 GPa.
Die Abweichungen bei allen Proben waren bei dieser Messung messtechnisch bedingt noch kleiner als bei der Messung der Ultraschalllaufgeschwindigkeit, mit Variationskoeffizienten im Bereich von 0,001 bis höchstens 0,008.
Nach der Hydrophobierung wurden bei allen Varianten und Ausrichtungen eine Erhöhung der Werte beobachtet, ähnlich wie bei der Messung des statischen Elastizitätsmoduls. Auch hier waren die Werte

bei paralleler Ausrichtung am höchsten. Die Varietät Lappen mit senkrechter Schichtung hatte die stärkste Erhöhung um 8,65 GPa, während die niedrigste Erhöhung von 6,11 GPa bei Unterpaol mit paralleler Schichtung beobachtet wurde. Die höchsten Werte wurden bei der Varietät Lappen mit paralleler Schichtung mit einem Wert von 6,19 GPa verzeichnet. Die niedrigsten Werte von 18,61 GPa wurden bei Unterpaol mit senkrechter Schichtung beobachtet.

Fazit

Als ergänzender Beitrag zum Thema beschäftigt sich dieses Untersuchungsprogramm mit den drei Varianten Unterpaol, Oberpaol und Lappen des Baumberger Kalksandsteins, sowohl vor als auch nach der Hydrophobierung. Ziel war es, die Auswirkungen von KSE-H auf das Wasseraufnahmeverhalten und die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Wasseraufnahmeverhalten zeigten, dass sich die massen- und volumenbezogene Wasseraufnahme sowie die w-Werte der Gesteinsvarietäten nach der Hydrophobierung stark verändert haben. Das Produkt KSE-H hatte eine starke hydrophobe Wirkung, aber in Verbindung mit einer beträchtlichen Änderung der Rohdichte war dieser Effekt bedenklich. Um die Veränderung der offenen Porosität durch die Behandlung mit diesem Präparat zu beurteilen, wäre eine Untersuchung der Dampfdurchlässigkeit hilfreich.

In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften ergab sich, dass die Festigkeiten des Baumberger Kalksandsteins nach der Hydrophobierung unabhängig von der Varietät und Richtung der Schichtung stark erhöht wurden. Die Ultraschallmessungen bestätigten diese Tendenzen. Allerdings wurde auch der E-Modul erhöht, was durch die Messungen des statischen und dynamischen Elastizitätsmoduls gezeigt wurde. Dies bedeutet, dass die Probekörper nach der Hydrophobierung weniger elastisch waren und somit weniger widerstandsfähig gegen Spannungen als die unbehandelten Probekörper.

6.6.6 Untersuchungen des thermischen und hygrischen Verhaltens von unbehandelten und hydrophobierten Baumberger Kalksandstein/ Teil1

(Peter Kozub; CICS Köln)

Einführung

Die thermische Dilatation, also die temperaturabhängige Längenänderung, hängt bei Natursteinen vor allem von den Ausdehnungskoeffizienten der gesteinsbildenden Minerale und dem Aufbau des Gesteins ab. Die Ausdehnungsvorgänge werden außerdem durch hydrisches (wassergesättigtes) und hygrisches (auf Luftfeuchtigkeit basierendes) Quellen beeinflusst[67]. Bisher gibt es vereinzelte, unsystematische und teilweise widersprüchliche Messungen des Baumberger Kalksandsteins. Die Studien haben selten Steinvarietäten und Probenausrichtungen berücksichtigt oder erwähnt. Die Folgen der wiederholten Erwärmung und einer möglichen Restexpansion in diesem Gestein bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Keine dieser Studien berücksichtigt den Einfluss von Feuchtigkeit auf die Messung.

Auch die hygrothermische Ausdehnung von Baumberger Kalksandsteinproben nach Hydrophobierung ist noch nicht untersucht worden.

Da das thermische Verhalten des Baumberger Kalksandsteins und die spezifische Wirkung der Feuchtigkeit bisher nicht ausreichend untersucht wurden, ist es nicht möglich, die Bedeutung dieser Faktoren, insbesondere beim Verwitterungsprozess dieses Gesteins nach der Hydrophobierung, zu beurteilen. Die in diesem Projekt vorgestellte Studienreihe zielt darauf ab, dieses dringende Desiderat durch die Einbeziehung dieser Zusammenhänge zu erfüllen.

[67] Eindeutige Unterteilungen in hygrische und hydrische Vorgänge finden sich bei GRAUE 2013; GRAUE et al. 2013; WEDEKIND 2016; WEDEKIND et al. 2016.

Im ersten, hier vorgestellten Teil wurde die thermische Dilatation von unbehandelten Baumberger Kalksandsteinproben bei geringer Feuchte untersucht.

Methodik der Untersuchung

Messgerät

Für die thermomechanische Analyse (TMA) wurde ein thermomechanischer Analysator *TMA 402 F3 Hyperion* von Netzsch verwendet. Ergänzt wurde das Gerät durch einen MHG-Feuchtegenerator mit Temperaturregler *TRG 004*, der Messungen unter Zufuhr von Wasserdampf in einer kontrollierten Feuchteumgebung ermöglicht.

Prüfkörper

Als Proben wurden kleine Bohrkerne von ca. 7 mm Durchmesser und 30 mm Höhe verwendet. Die Proben wurden aus quaderförmigem Baumberger Kalksandstein, Oberpaol aus dem Steinbruch Fark (Steinblock OP 2.2) sowohl parallel als auch senkrecht zur Steinschichtung nass gebohrt **Abb. 125 – Abb. 126**. Die Bohrkerne wurden auf einer Feinsäge auf eine Länge von ca. 30 mm geschnitten. Dabei wurde auf die Parallelität der Seiten geachtet. Anschließend wurde der Steinstaub unter fließendem Wasser von der Probenoberfläche entfernt. Es folgte eine einwöchige Trocknungszeit unter Raumbedingungen (ca. 20°C, ca. 50 % rF).

Danach wurden die Proben in einem Probenhalter in den Ofen des Geräts platziert. Die Messung selbst folgte einem vordefinierten Zyklus (siehe unten Versuchsaufbau). Während der Messung wurde die Änderung der Probenlänge gemessen und in Echtzeit aufgezeichnet.

Abb. 125: *Masse des Steinblocks OP 2.2 und Ausrichtung der Proben (grün II, blau ⊥).*

Abb. 126*: Das Herausbohren der Bohrkerne.*

Versuchsaufbau

Die Proben wurden unter den folgenden Parametern getestet:

Bei allen Versuchsreihen wurden die Proben mit einem Anpressdruck von 0,02 N in die Apparatur eingespannt. Der Anpressdruck wurde während der Messung konstant gehalten. Die Ausgangslänge der Proben wurde s.o. vor jeder Messung automatisch von der TMA ermittelt.

Testreihe A1a (einmalige Erhöhung der Temperatur von 20 auf 80°C bei konstanter rF, je zwei Serien – parallel und senkrecht zu Schichtung á 3 Proben)

Startparameter: 20°C / **15** % rF
Dauer Startphase: 60 Min.
Parameter der ersten Phase: 20°C / **15** % rF
Dauer der ersten Phase: 60 Min.
Parameter der zweiten Phase: 80°C / **15** % rF
Heizrate: 0,5°C/Min.
Dauer der zweiten Phase: 60 Min.

Endparameter: 20°C / **15** % rF
Abkühlrate: 0,5°C/Min.
Dauer der Endphase: 60 Min.

Testreihe A2a (dreimalige Wiederholung des Programms des Tests A1a, je zwei Serien – parallel und senkrecht zu Schichtung á 3 Proben)

Testreihe A1b (einmalige Erhöhung der Temperatur 20-80°C bei konstanter aF, je zwei Serien – parallel und senkrecht zu Schichtung á 3 Proben)

Startparameter: 20°C / 15 % rF (absolute Feuchte ρ_w **2,59** g/m^3)
Dauer Startphase: 60 Min.
Parameter der ersten Phase: 20°C / 15 % rF (absolute Feuchte ρ_w **2,59** g/m^3)
Dauer der ersten Phase: 60 Min.
Parameter der zweiten Phase: 80°C / 0,89 % rF (absolute Feuchte ρ_w **2,59** g/m^3)
Heizrate: 0,5°C/Min.
Dauer der zweiten Phase: 60 Min.
Endparameter: 20°C /15 % rF (absolute Feuchte ρ_w **2,59** g/m^3)
Abkühlrate: 0,5°C/Min.
Dauer der Endphase: 60 Min.

Testreihe A2b (dreimalige Wiederholung des Programms des Tests A2a, je zwei Serien – parallel und senkrecht zu Schichtung á 3 Proben)

Messergebnisse
Alle Messwerte sind in
Tab. 54 und in den folgenden **Diagr. 43** – **Diagr. 49** dargestellt.

Die Ergebnisse der Testreihe A1a sind im **Diagr. 43**: Testreihe A1a I⊥(Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, II, unbehandelt, Proben BKS_p_02_u; BKS_p_03_u; BKS_p_04_u) und **Diagr. 42** (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, ⊥, unbehandelt, Proben BKS_s_01_u; BKS_s_02_u; BKS_s_03_u) dargestellt:

***Diagr. 42**: Testreihe A1a II.*

***Diagr. 43**: Testreihe A1a I⊥*

Da die relative Feuchte bei den gewählten Parametern der A1a-Testreihe konstant gehalten wurde, stieg die absolute Feuchte bei Erhöhung der Temperatur auf 80°C entsprechend an (absolute Feuchte bei 20°C/15 % rF → 2,59 g/m^3; bei 80°C/15 % rF → 43,72 g/m^3).

Deshalb wurde in den folgenden Versuchen die Messung der Wärmeausdehnung bei konstanter absoluter Feuchte durchgeführt. Zunächst wurde die bei 20°C und 15% rF herrschende absolute Luftfeuchtigkeit gewählt, d.h. 2,59 g/m³ (bei 80°C entspricht dies einer relativen Luftfeuchtigkeit von 0,89 %, siehe Parameter-Testreihe A1b).
Die Ergebnisse der A1b-Testreihe sind in den **Diagr. 44 – Diagr. 45** zu sehen. Im Diagr**. 44** (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, II, unbehandelt, Proben BKS_p_05_u; BKS_p_07_u; BKS_p_08_u) und im **Diagr. 45** (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, ⊥, unbehandelt, Proben BKS_s_05_u; BKS_s_10_u):

***Diagr. 44**: Testreihe A1bII.*

***Diagr. 45**: Testreihe A1b⊥.*

Messungen mit Parametern aus den Testreihen A1a und A1b wurden dreimal an den gleichen Proben der Testreihen A2a und A2b wiederholt. Die Abschnitte zwischen den Zyklen (20°C/10 % rF bzw. 20°C/w 2,59 g/m³) dauerten 60 Min.

Die Ergebnisse der A2a-Testreihe sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Im **Diagr. 47** (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, II, unbehandelt, Proben BKS_p_02_u; BKS_p_03_u; BKS_p_04_u) und im **Diagr. 46** (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, ⊥, unbehandelt, Proben BKS_s_01_u; BKS_s_02_u; BKS_s_03_u):

***Diagr. 46**: Testreihe A2a II.*

***Diagr. 47**: Testreihe A2a ⊥.*

Die Ergebnisse der Testreihe A2b sind in den Diagrammen **Diagr. 48** und **Diagr. 49** zu sehen. (**Diagr. 48**- Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, II, unbehandelt, Proben BKS_p_05_u;

BKS_p_07_u; BKS_p_08_u; **Diagr. 49** – Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, ⊥, unbehandelt, Proben BKS_s_05_u; BKS_s_10_u):

***Diagr. 48**: Testreihe A2b II.*

***Diagr. 49**: Testreihe A2b ⊥*

Auswertung

Überraschenderweise liegen die technischen α-Werte im Vergleich zu den Messungen von Pewny / Kirchner im deutlich niedrigeren Bereich (Vergleich der Probenwerte von Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol - bei Pewny / Kirchner - II min. 4,7737E-06 K^{-1} max. 5,2499E-06 K^{-1}; ⊥ min. 5,7602E-06 K-1 max. 6,6624E-06 K^{-1}) (PEWNY et al., 2020, S17 u. 67-68). Frühere Messungen von (MÜLLER-ROCHHOLZ , 1988 nach VISSER & MIRWALD, 1998, S.40) zeigen ebenfalls deutlich höhere Werte (*„8 µm/m/°K"* – das entspricht den technischen α-Wert von 8,0E-06 K^{-1}) (MÜLLER-ROCHHOLZ nach VISSER & MIRWALD, 1998, S.40). Nach derzeitigem Kenntnisstand ist dieses Phänomen nicht eindeutig geklärt.

***Tab. 54:** Zusammenfassung der Ergebnisse.*

Testreihe		Probe	l_0	Δl	$Δl_{20-80}$	α	Δl	$Δl_{20-80}$	α	Δl	$Δl_{20-80}$	α
			[mm]	[µm]	[mm/m]	[K^{-1}]	[µm]	[mm/m]	[K^{-1}]	[µm]	[mm/m]	[K^{-1}]
A1a und A2a (parallele Ausrichtung)		BKS_p_02_u	29,87	6,8	0,23	3,778E-06	6,7	0,22	3,749E-06	6,7	0,22	3,743E-06
		BKS_p_03_u	29,87	5,8	0,19	3,228E-06	5,6	0,19	3,147E-06	5,5	0,18	3,075E-06
		BKS_p_04_u	29,98	6,5	0,22	3,626E-06	6,6	0,22	3,649E-06	6,6	0,22	3,642E-06
		Mittelwert	29,91	6,4	0,22	3,673E-06	6,3	0,21	3,516E-06	6,3	0,21	3,488E-06
A1a und A2a (senkrechte Ausrichtung)		BKS_s_01_u	29,86	6,9	0,23	3,868E-06	6,8	0,23	3,811E-06	6,7	0,22	3,733E-06
		BKS_s_02_u	29,89	6,0	0,20	3,360E-06	6,1	0,20	3,376E-06	6,0	0,20	3,338E-06
		BKS_s_03_u	29,93	7,0	0,23	3,906E-06	7,0	0,23	3,910E-06	7,0	0,23	3,893E-06
		Mittelwert	29,89	6,7	0,23	3,964E-06	6,6	0,22	3,703E-06	6,6	0,22	3,669E-06
A1b und A2b (parallele Ausrichtung)		BKS_p_05_u	29,86	5,8	0,19	3,212E-06	5,6	0,19	3,104E-06	5,5	0,18	3,053E-06
		BKS_p_07_u	29,89	1,6	0,05	9,087E-07	2,0	0,07	1,115E-06	2,0	0,07	1,129E-06
		BKS_p_08_u	29,88	5,6	0,19	3,140E-06	5,8	0,19	3,222E-06	5,7	0,19	3,165E-06
		Mittelwert	29,88	4,3	0,19	3,340E-06	4,4	0,19	3,172E-06	4,4	0,19	3,126E-06
A1b und A2b (senkrechte Ausrichtung)		BKS_s_05_u	29,88	6,3	0,21	3,518E-06	7,2	0,24	4,021E-06	7,7	0,26	4,307E-06
		BKS_s_10_u	29,91	5,2	0,17	2,882E-06	5,2	0,17	2,872E-06	5,1	0,17	2,817E-06
		Mittelwert	29,90	5,7	0,20	3,446E-06	6,2	0,21	3,476E-06	6,4	0,22	3,593E-06

Diese Unterschiede können jedoch auf unterschiedliche Messparameter zurückzuführen sein. Zum Beispiel sind die gewählten Messtemperaturbereiche sehr unterschiedlich (MÜLLER-ROCHHOLZ -30-80°C;

PEWNY / KIRCHNER -25-80°C). Auch die Aufheiz- und Abkühlraten sind, soweit sie nachvollziehbar sind, völlig unterschiedlich (PEWNY / KIRCHNER – 1 K/Min.). Ebenso ist die Dauer der Intervalle bei allen Messungen uneinheitlich. Es gibt keine Informationen über die während der Messungen herrschende Luftfeuchtigkeit.

Die in der Testreihe A1a gemessenen Proben zeigen Werte (II min. 3,228E-06 K-1, max. 3,778E-06 K-1; ⊥ min. 3,360E-06 K-1, max. 3,906E-06 K-1, arithmetischer Mittelwert II 3,673E-06 K-1; ⊥ 3,964E-06 K-1), die im Vergleich zu anderen Literaturquellen für Baumberger Kalksandstein eher im unteren Bereich (4,0-15,0E-06 K-1) (VENNEBÖRGER, 1987 nach LAMPRECHT, 1990, S.13) liegen und für natürliche Gesteine im Allgemeinen sehr niedrig sind(KOHLRAUSCH, 1996, S.357-360).
Wie erwartet, liegen die Werte für die senkrechten Proben in den höheren Bereichen, wobei die Unterschiede zwar signifikant, aber minimal sind.
Die in der Testreihe A1b gemessenen Proben zeigen im Vergleich zur Testreihe A1a niedrigere Werte (II min. 3,140E-06 K-1, max. 3,212E-06 K-1; ⊥ min. 2,882E-06 K-1, max. 3,446E-06 K-1, arithmetischer Mittelwert II 3,340E-06 K-1; ⊥ 3,446E-06 K-1).
Das Probenmaterial BKS_p_07_u verhält sich deutlich anders. Daher wird sie als Ausreißer aus der Berechnung des arithmetischen Mittels der technischen α-Werte aus dieser Testreihe A1b, sowie aus der Testreihe A2b (siehe unten) ausgeschlossen. [68]
In beiden Testreihen A2a und A2b ist zu erkennen, dass 60 Minuten Abkühlung nicht ausreichen, um endgültige Aussagen über die Restdehnung zu treffen. Am Ende dieser Zeit flacht die Dehnungskurve ab, erreicht aber noch nicht einen konstanten Wert. Diese Verzögerung ist bei Proben mit senkrechter Ausrichtung stärker ausgeprägt. [69]
Dennoch lassen die Messungen einige Aussagen über die Entwicklung der maximalen Dehnung nach wiederholter Erwärmung zu. In beiden Probenserien (senkrecht und parallel zur Schichtung) bei konstanter relativer Feuchte (Testreihe A2a) nimmt nach wiederholter Erwärmung die maximale Dehnung und damit der Wert von α ab. Diese Reduktionen sind zwar recht gering, aber dennoch auffällig (Proben II - Reduktion des α-Wertes nach der zweiten Erwärmung um 4,1 %, nach der dritten Erwärmung um 0,8 %, insgesamt nach drei Erwärmungen 4,9 %; Proben - Reduktion des α-Wertes nach der zweiten Erwärmung um 6,6 %, nach der dritten Erwärmung um 0,8 %, insgesamt nach drei Erwärmungen 7,3 %). Tendenziell zeigt sich also eine stärkere Senkung der Werte bei den Proben, die senkrecht zur Schichtung gemessen wurden. Bei beiden Probenreihen ist die Senkung nach der ersten Erwärmung größer.
Ebenso sinken die α-Werte bei Proben mit paralleler Orientierung, die bei konstanter absoluter Feuchte gemessen wurden (Versuchsreihe A2b). Hier sogar in deutlich größerem Ausmaß als bei Proben mit paralleler Orientierung, gemessen bei konstanter relativer Feuchte (Abnahme der α-Werte nach der 2. Erwärmung um 5,1 %, nach der 3. Erwärmung um 1,2 %, insgesamt nach drei Erwärmungen 6,3 %). Auch in diesem Fall ist die Abnahme nach der ersten Erwärmung größer. Bei Proben mit vertikaler Orientierung, gemessen bei konstanter absoluter Feuchte, steigen die α-Werte dagegen an (Anstieg des α-Wertes nach der zweiten Erwärmung um 0,9 %, nach der dritten Erwärmung um 3,2 %, insgesamt nach drei Erwärmungen 4,1 %). In diesem Fall ist der Anstieg nach der ersten Erwärmung am geringsten.

[68] Die Werte der beiden Serien (II und ⊥) in den Testreihen A1b und A2b basieren somit auf Messungen an zwei Proben. Dieses wird durch eine zusätzliche Messung ergänzt.
[69] Diese Phase wird in den künftigen Messungen um eine Stunde verlängert.

6.6.7 Untersuchungen des thermischen und hygrischen Verhaltens von unbehandelten und hydrophobierten Baumberger Kalksandstein/ Teil2

(Peter Kozub; CICS Köln)

Einführung

Im zweiten Teil der vorliegenden Studie wird die hygrothermische Dehnung von Baumberger Kalksandsteinproben nach der Applikation des Hydrophobierungsmittels KSE H[70] untersucht. Die verwendeten Proben sind dieselben wie im ersten Teil der Untersuchung, in welchem das thermische Verhalten sowie die progressive Restdehnung bei niedriger relativer Feuchte (Tests A1b und A2b) analysiert wurden. Das Ziel der Untersuchung ist, mittels des Vergleichs der Dehnungswerte vor und nach der Hydrophobierung neue Erkenntnisse über die Verwitterungsprozesse von Objekten aus diesem Material zu erlangen.

Methodik der Untersuchung

Messgerät

Im Rahmen dieser Studie wurde für die Durchführung der thermomechanischen Analyse (TMA) auch in diesem Teil ein thermomechanischer Analysator *TMA 402 F3 Hyperion* in Verbindung mit einem *MHG*-Feuchtegenerator mit Temperaturregler *TRG 004* von Netzsch eingesetzt.

Prüfkörper

Für die Durchführung dieser Untersuchung wurden folgende Proben für die Messungen genutzt: BKS_p_05_u, BKS_p_07_u, BKS_p_08_u, BKS_s_05_u und BKS_s_10_u.[71] Nach den Messungen im ersten Teil dieser Studie wurden die Proben für eine Woche bei Raumbedingungen (ca. 20°C und 50% relative Luftfeuchtigkeit) klimatisiert und anschließend mit dem Produkt KSE H kapillar getränkt. Dabei wurde die Menge der Flüssigkeit kontinuierlich erhöht, sobald der sichtbare Tränkungshorizont über den Flüssigkeitsstand gestiegen war. Nach vollständiger Tränkung wurden die Proben mit der Tränkungsflüssigkeit bedeckt, sodass ein Überschuss von etwa 2 cm vorhanden war. Sodann lagerten sie für weitere 2 Stunden in einem abgeschlossenen Behälter. Anschließend wurden die Proben aus dem Tränkungsbehälter entnommen und für 48 Stunden bei Raumbedingungen (ca. 20°C und 50% relative Luftfeuchtigkeit) auf einem Gitter gelagert.

Danach wurden die Proben in einem Probenhalter im Ofen des thermomechanischen Analysators platziert und gemessen. Die Messung erfolgte gemäß einem vordefinierten Zyklus, der auch bei den Tests A1b und A2b im ersten Teil der Studie angewendet wurde. Während der Messung wurde die Änderung der Probenlänge in Echtzeit erfasst und aufgezeichnet.

Versuchsaufbau

Nach den Ergebnissen der anfänglichen Messungen in der vorliegenden Studie wurde beschlossen, Messungen unter konstanter absoluter Feuchte durchzuführen (vergleichbar der Testreihen A1b und A2b). Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse zwischen den Messungen im ersten Teil der Studie und den aktuellen Messungen vergleichbar sind, wurden trotz einiger problematischer Einstellungen die Parameter dieser Tests beibehalten. Wie bei den vorherigen Messungen wurde ein konstanter Anpressdruck von 0,02 N während der Messung aufrechterhalten, und die Länge der Proben wurde vor jeder Messung automatisch von der TMA bestimmt.

[70] KSE H ist ein Hydrophobierungsmittel und Festiger der Firma Remmers. Als Hauptbestandteil wird ein Tetraethylsilikat genannt. Darüber hinaus enthält es einen nicht näher spezifizierten Alkylalkoxysilan und Dioctylzinndilaurat als Katalysator.

[71] Bei der Bezeichnung der Proben wird nach der Behandlung jeweils der Index „u“ (für unbehandelt) durch den Index "b" (für behandelt) ersetzt: BKS_p_05_b; BKS_p_07_b; BKS_p_08_b und BKS_s_05_b; BKS_s_10_b.

Messergebnisse

In **Tab. 55** und den folgenden **Diagr. 50** – **Diagr. 53** sind sämtliche Messwerte dieser Untersuchung enthalten.

Die Ergebnisse für die Testreihe A1b-R[72] an den Proben parallel zu Schichtung (Baumberger Kalksandstein aus dem Steinbruch Fark, Oberpaol, II, hydrophobiert, Proben BKS_p_02_b, BKS_p_03_b und BKS_p_04_b) sind im **Diagr. 50** dargestellt. Die Ergebnisse der Testreihe an den Proben senkrecht zu Schichtung (Baumberger Kalksandstein aus dem Steinbruch Fark, Oberpaol, in ⊥, hydrophobiert, Proben BKS_s_01_b, BKS_s_02_b und BKS_s_03_b) sind im **Diagr. 51** zu finden.

***Diagr. 50**: Testreihe A1b-R II.*

***Diagr. 51**: Testreihe A1b-R ⊥*

Die Messungen mit Parametern aus der Testreihe A1b-R wurden anschließend dreimal an denselben Proben in der Testreihe A2b-R wiederholt. Die Abschnitte zwischen den Zyklen (20°C/10 % rF bzw. 20°C/w 2,59 g/m3) betrugen jeweils 60 Minuten (siehe Parameter: Teil I, Testreihe A2b).

Die Ergebnisse der Testreihe A2b-R sind in den **Diagr. 52** – **Diagr. 53** zu sehen.

Im **Diagr. 52** die Ergebnisse der Messungen an den Proben parallel zu Schichtung (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, II, hydrophobiert, Proben BKS_p_05_b; BKS_p_07_b; BKS_p_08_b) und im **Diagr. 53** die Ergebnisse der Messungen an den Proben senkrecht zu Schichtung (Baumberger Kalksandstein, Steinbruch Fark, Oberpaol, ⊥, hydrophobiert, Proben BKS_s_05_b; BKS_s_10_b).

***Diagr. 52**: Testreihe A2b-R II*

***Diagr. 53**: Testreihe A2b-R ⊥*

[72] Die Testreihen nach der Behandlung werden durch den Index "R" (für repeat) gekennzeichnet: A1b-R und A2b-R.

Auswertung

In beiden Testreihen A1b-R und A2b-R verläuft die Dehnungskurve ähnlich wie in den Testreihen A1b und A2b. Jedoch zeigen die Proben, die in der Testreihe A1b-R nach der Hydrophobierung gemessen wurden (II min.: 1,953E-06 K^{-1}, max.: 3,274E-06 K^{-1}; ⊥ min.: 1,600E-06 K^{-1}, max.: 1,796E-06 K^{-1}, arithmetischer Mittelwert: II [ohne Probe BKS_p_07_b[73]] 2,613E-06 K^{-1}; ⊥ 1,698E-06 K^{-1}), im Vergleich zu den Werten der Testreihe A1b (II min.: 3,140E-06 K^{-1}, max.: 3,212E-06 K^{-1}; ⊥ min.: 2,882E-06 K^{-1}, max.: 3,518E-06 K^{-1}, arithmetischer Mittelwert: II [ohne Probe BKS_p_07] 3,340E-06 K^{-1}; ⊥ 3,446E-06 K^{-1}) starke Unterschiede (siehe auch Abschnitt „Vergleich der Werte vor und nach der Hydrophobierung").
Die gemessenen Werte für die parallel zur Schichtung ausgerichteten Proben sind auch nach der Hydrophobierung breiter zerstreut als bei den senkrecht zur Schichtung ausgerichteten Proben, die in diesem Fall signifikant niedriger sind.

Darüber hinaus liefern die Messungen in der Testreihe A2b-R einige Erkenntnisse über die Entwicklung der maximalen Dehnung nach wiederholter Erwärmung. Bei konstanter absoluter Feuchte nach der Hydrophobierung nimmt die maximale Dehnung und somit der Wert von α nach wiederholter Erwärmung in der Probenserie parallel zur Schichtung zu.

Tab. 55: *Zusammenfassung der Ergebnisse der Testreihen A1b-R und A2b-R (Proben nach der Hydrophobierung).*

Erwärmungsphase			**I**			**II**			**III**		
Testreihe	**Probe**	l_0	**Δl**	Δl_{20-80}	**α**	**Δl**	Δl_{20-80}	**α**	**Δl**	Δl_{20-80}	**α**
		[mm]	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**
A1b-R und A2b-R (parallele Ausrichtung)	BKS_p_05_b	29,86	5,9	0,20	3,274E-06	6,4	0,21	3,550E-06	6,6	0,22	3,707E-06
	BKS_p_07_b	29,88	3,7	0,12	2,072E-06	3,7	0,12	2,058E-06	3,6	0,12	2,014E-06
	BKS_p_08_b	29,86	3,5	0,12	1,953E-06	3,5	0,12	1,980E-06	3,6	0,12	1,994E-06
	Mittelwert (2 Proben)	29,86	4,7	0,16	2,613E-06	5,0	0,17	2,765E-06	5,1	0,17	2,851E-06
	Mittelwert (3 Proben)	29,86	4,4	0,15	2,433E-06	4,5	0,15	2,529E-06	4,6	0,15	2,572E-06
A1b-R und A2b-R (senkrechte Ausrichtung)	BKS_s_05_b	29,87	3,2	0,11	1,796E-06	3,4	0,11	1,871E-06	3,3	0,11	1,853E-06
	BKS_s_10_b	29,89	2,9	0,10	1,600E-06	3,1	0,10	1,745E-06	2,4	0,08	1,361E-06
	Mittelwert	29,88	3,0	0,10	1,698E-06	3,2	0,11	1,808E-06	2,9	0,10	1,607E-06

Obwohl die Steigerung der α-Werte nach der zweiten Erwärmung um 5,8 % und nach der dritten Erwärmung um 3,3 % in den Proben II nur gering ist, fällt sie dennoch auf. Insgesamt ergibt sich nach drei Erwärmungen eine Steigerung von 9,1 %. Bei den Proben, die senkrecht zur Schichtung gemessen wurden, zeigt sich hingegen ein differenzierteres Bild. Hier sind die α-Werte nach der zweiten Erwärmung um 6,5 % gestiegen, jedoch ist nach der dritten Erwärmung der Wert um 11,8 % gesunken, so dass sich insgesamt nach drei Erwärmungen eine Reduktion der α-Werte um 5,4 % ergibt.

Vergleich der Werte vor und nach der Hydrophobierung

Um den Gefährdungsgrad der Faktoren Temperatur und Feuchte in Bezug auf die Verwitterung von Baumberger Kalksandstein einschätzen zu können, müssen die Tendenzen, die bei Tests mit hydrophobierten Proben beobachtet wurden, im Vergleich zu unbehandelten Proben betrachtet werden.

[73] Da sich das Probenmaterial BKS_p_07_u im ersten Teil der Studie deutlich anders verhielt, wurde es als Ausreißer aus der Berechnung des arithmetischen Mittels der technischen α-Werte der Testreihe A1b und A2b ausgeschlossen (siehe Teil I, Abschnitt "Auswertung"). Obwohl die Messwerte der Probe BKS_p_07_b im mittleren Bereich liegen, wurden sie, um die Vergleichbarkeit beider Messungen (vor und nach der Hydrophobierung) sicherzustellen, ebenfalls aus der Berechnung des arithmetischen Mittels der technischen α-Werte der Testreihe A1b-R und A2b-R (siehe unten) ausgeschlossen. In den Tabellen sind diese Reihen rot markiert.

Dies ermöglicht es, die Prozesse im Inneren des thermisch belasteten Materials zu erkennen und deren Rolle bei der Verwitterung zu verstehen. Dabei sind die Unterschiede im Dilatationsverhalten zwischen unbehandeltem und hydrophobiertem Material entscheidend. Je größer diese Unterschiede sind, desto höher sind die möglichen Spannungen im Grenzbereich und desto größer ist die damit verbundene Zerstörung der Steinstrukturen.

***Diagr. 54**: Vergleich A1b und A1b-R II.*

***Diagr. 55**: Vergleich A1b und A1b-R ⊥.*

***Diagr. 56**: Vergleich A2b und A2b-R II.*

***Diagr. 57**: Vergleich A2b und A2b-R ⊥.*

***Tab. 56 :** Vergleich der Ergebnisse der Testreihen A1b/A2b (unbehandelte Proben) und A1b-R/A2b-R (Proben nach der Hydrophobierung).*

Erwärmungsphase				**I**			**II**			**III**		
Testreihe		**Probe**	l_0	Δl	$\Delta l_{20\text{-}80}$	α	Δl	$\Delta l_{20\text{-}80}$	α	Δl	$\Delta l_{20\text{-}80}$	α
			[mm]	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**	**[µm]**	**[mm/m]**	**[K^{-1}]**
unbehandelt	A1b und A2b (parallele Ausrichtung)	BKS_p_05_u	29,86	5,8	0,19	3,212E-06	5,6	0,19	3,104E-06	5,5	0,18	3,053E-06
		BKS_p_07_u	29,89	1,6	0,05	9,087E-07	2,0	0,07	1,115E-06	2,0	0,07	1,129E-06
		BKS_p_08_u	29,88	5,6	0,19	3,140E-06	5,8	0,19	3,222E-06	5,7	0,19	3,165E-06
		Mittelwert (2 Proben)	29,88	5,7	0,19	3,340E-06	5,7	0,19	3,172E-06	5,6	0,19	3,126E-06
		Mittelwert (3 Proben)	29,88	4,3	0,15	2,42E-06	4,4	0,15	2,480E-06	4,4	0,15	2,449E-06
		BKS_s_05_u	29,88	6,3	0,21	3,518E-06	7,2	0,24	4,021E-06	7,7	0,26	4,307E-06
		BKS_s_10_u	29,91	5,2	0,17	2,882E-06	5,2	0,17	2,872E-06	5,1	0,17	2,817E-06

	A1b und A2b (senkrechte Ausrichtung)	Mittelwert	29,90	5,7	0,20	3,446E-06	6,2	0,21	3,476E-06	6,4	0,22	3,593E-06
hydrophobiert	A1b-R und A2b-R (parallele Ausrichtung)	BKS_p_05_b	29,86	5,9	0,20	3,274E-06	6,4	0,21	3,550E-06	6,6	0,22	3,707E-06
		BKS_p_07_b	29,88	3,7	0,12	2,072E-07	3,7	0,12	2,058E-06	3,6	0,12	2,014E-06
		BKS_p_08_b	29,86	3,5	0,12	1,953E-06	3,5	0,12	1,980E-06	3,6	0,12	1,994E-06
		Mittelwert (2 Proben)	29,86	4,7	0,16	2,613E-06	5,0	0,17	2,765E-06	5,1	0,17	2,851E-06
		Mittelwert (3 Proben)	29,86	4,4	0,15	2,433E-06	4,5	0,15	2,529E-06	4,6	0,15	2,572E-06
	A1b-R und A2b-R (senkrechte Ausrichtung)	BKS_s_05_b	29,87	3,2	0,11	1,796E-06	3,4	0,11	1,871E-06	3,3	0,11	1,853E-06
		BKS_s_10_b	29,89	2,9	0,10	1,600E-06	3,1	0,10	1,745E-06	2,4	0,08	1,361E-06
		Mittelwert	29,88	3,0	0,10	1,698E-06	3,2	0,11	1,808E-06	2,9	0,10	1,607E-06

Die Verläufe der Dehnungskurven und Messwerte der Testreihen A1b und A2b (Messungen an unbehandelten Proben) wurden in Diagrammen **Diagr. 54** – **Diagr. 57** und **Tab. 56** mit den Daten der Testreihen A1b-R und A2b-R (Messungen an hydrophobierten Proben) verglichen.
Beim Vergleich der Erwärmungskurven in **Diagr. 54** – **Diagr. 55** (Probenreihen A1b und A1b-R) fällt auf, dass die Unterschiede bei den unbehandelten Proben parallel und senkrecht zur Schichtung nicht so groß sind. Bei den hydrophobierten Proben hingegen sind die Unterschiede wesentlich größer, insbesondere bei senkrechter Orientierung (**Diagr. 55**), wo die α-Werte deutlich kleiner sind.
Besonders wichtig sind die Verläufe der Dehnungskurven bei wiederholter Erwärmung. Diese werden in **Diagr. 56** – **Diagr. 57** dargestellt (Probenreihen A2b und A2b-R). Hier zeigt sich ganz deutlich ein unterschiedliches Dehnungsverhalten zwischen unbehandelten und behandelten Proben. Bei einmaliger Erwärmung bei paralleler Orientierung sind die α-Werte der hydrophobierten Proben nur geringfügig kleiner als bei unbehandelten Proben. Bei mehrmaliger Erwärmung steigen sie jedoch kontinuierlich an und nähern sich den immer kleineren Werten der unbehandelten Proben an (**Diagr. 56**). Bei senkrechter Orientierung sind die α-Werte der hydrophobierten Proben von Anfang an deutlich niedriger und werden tendenziell immer kleiner, während sie bei unbehandelten Proben nach jeder Erwärmung stetig größer werden. Dadurch wird die Differenz zu den unbehandelten Proben immer größer (**Diagr. 57**).

Fazit

Der Fokus der vorliegenden Studie lag auf der Analyse der thermischen Ausdehnung von Baumberger Kalksandstein bei konstanter absoluter Feuchte. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten konnten die geplanten Messungen mit höherer relativer Feuchte nicht durchgeführt werden (KOZUB, 2000a, S.20). Dennoch ergab der Vergleich der Messwerte aus dem ersten Teil der Studie bei konstanter relativer Feuchte mit den Messungen bei konstanter absoluter Feuchte (A1a/A2a und A1b/A2b), einige wichtige Erkenntnisse bezüglich des Einflusses von Feuchtigkeitsveränderungen auf die Dehnung von Baumberger Kalksandstein. Deutlich ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Feuchtigkeit in der Umgebung zu einer Verstärkung der Dehnung bei diesem Material führt.

Somit zeigen die Ergebnisse dieser Studie eindeutig, dass sowohl thermische als auch hygrische Prozesse bei der Verwitterung von mit Hydrophobierungsmittel behandelten Baumberger Kalksandstein eine bedeutende Rolle spielen. Insbesondere sind die großen Unterschiede in der Dehnung der Proben parallel und senkrecht zur Schichtung bei diesem Material zu erwähnen. Diese Unterschiede sind nach der Behandlung mit einem Hydrophobierungsmittel sogar noch größer.
Entscheidend für die schädliche Wirkung von Temperatur und Feuchtigkeit ist jedoch ein signifikant unterschiedliches Dehnungsverhalten bei unbehandelten und behandelten Proben.
Vor allem die gegenläufige Entwicklung der Dehnung vor und nach der Behandlung verstärkt deutlich die Spannungen im Grenzbereich der hydrophoben Zone bei Baumberger Kalksandstein und ist als

wichtiger Faktor bei der Schalenbildung zu betrachten. Diese Prozesse treten umso intensiver auf, je stärker die Wirkung von Wärme und Feuchtigkeit ist, bzw. je häufiger und schneller sich diese Parameter ändern können. Insbesondere dann, wenn diese Prozesse nahe an der Oberfläche ablaufen, können sie äußerst gefährlich werden.
Diese besonders bedrohliche Situation tritt auf, wenn die Hydrophobierungsmittelbehandlung nur im Oberflächenbereich durchgeführt wird. Da dies in der Vergangenheit oft der Fall war, je nachdem welches Hydrophobierungsmittel (KOZUB, 200b, S.28f) und welche Behandlungsmethode gewählt wurden, sind die Auswirkungen auf zahlreiche Objekte unübersehbar.

6.7 Schadenskatalog

(Jeannine Meinhardt; FH Potsdam, Friederike Funke; LWL-DLBW)

Die eingehenden Untersuchungen von Werkstein, Bauzier und skulpturalen Objekten aus Baumberger Kalksandstein, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, hatten zum Ziel ein detailliertes Verständnis der gesteinspezifische Schadensbilder zu erlangen, die an diesem Material auftreten können. Durch eingehende praxisnahe Untersuchungen konnten gesteinsspezifische Schadensbilder erkannt, dokumentiert und evaluiert für die Schadensdiagnostik zusammengefasst werden.

B_1_0_ Risse Risse sind eine klar erkennbare Unterbrechung in der Oberfläche.	
B_1_01 Einzelriss Einzelrisse zeigen sich in variierenden Rissbreiten von schmalen Haarrissen mit einer Breite ≤ 1mm bis zu mehreren Millimeter breiten Rissen. Risse können im Gesteinsgefüge entstehen oder markieren Gefügeveränderungen wie z.B. eine Schalenbildung. Häufig treten Risse an den Verbindungs-stellen von verschiedenen Materialien auf wie z.B. zwischen Stein und Mörtelergänzungen.	

B_1_02_Rissnetz Rissnetze treten häufig in Kombination mit Hohlstellen oder in Beziehung zu oberflächen-parallelen Schalen auf, die sich spannungsreich über gewölbte Oberflächen ausgebildet haben, z. B. Knie an Skulpturen. Überwiegend sind es schmale Haarrisse mit einer Breite von ≤ 1mm.	

B_2_0_ Ablösung Ablösungen definiert die Abhebung/Verlust der originalen Steinoberflächenstruktur.	
B_2_01 Abmehlen Abmehlen ist ein Ablösen von einzelnen Körnern oder Korn-aggregaten, das als Ablagerungen von sehr feinen Partikeln puderartig bis sandig auf der Oberfläche erkennbar ist.	

B_2_02 Abschuppen Abschuppen äußert sich in ein- oder mehrlagigen Schuppen als oberflächenparallele, dünne Aggregate, unregelmäßig bis wenige cm groß. Graduell gehen einlagige und mehrlagige Bereiche ineinander über, z.T. blätterteigartige Zonen. Sie entsprechen mehreren abschuppenden Bereichen übereinander. Rückwitterung von max. 5 mm möglich.	
B_2_03 Mürbzone (Aufblättern) Unter Mürbzone versteht man Bereiche mit dünnen, flächigen, oberflächenparallelen Ablösungen der äußeren Steinschicht, welche mehrlagig, blätterteigartig überlagernd vorkommen. Dieses Phänomen findet sich häufig in Regen geschützten Bereichen. Teilweise ist zu beobachten, dass mehrlagig abschuppende Bereiche graduell in Schalenbildungen übergehen.	

Schalenbildung
Unter Schalenbildung ist eine großflächige Ablösung eines in sich festen flächigen Stückes zu verstehen. Oberflächenparallele Schalenbildungen sind ein charakteristisches „Verwitterungsphänomen" von Baumberger Kalksandstein, die in unterschiedlichen Phänotypen auftreten können.

B_2_04 Schalenbildung < 3 mm Auf instabilem Untergrund (Mürbzone). Dünnschichtige Schalen bilden sich parallel zur Oberfläche aus, unabhängig von der geologischen Schichtung, in einer Dicke von <0,3 cm. Die Schalenbildung entsteht über einem instabilen, häufig schuppenden Untergrund. Typisch sind eine zum Rand hin stärkere Ablösung der dünnen Schalen und leichte Deformationen. Bei Verlust der dünnen oberflächenparallelen Schalen liegt morbides Gefüge offen. Die Schadensphänomene Schale auf instabilem Untergrund und Schuppen gehen ineinander über.	

B_2_04 Schalenbildung < 3 mm Auf stabilem Untergrund. Dünne Schalen, die sich stets oberflächenparallel entlang der Objektkontur mit einer Schichtdicke <0,3 cm ausbilden, unabhängig von der geologischen Schichtung. Typisch sind eine zum Rand hin stärkere Ablösung der dünnen Schalen und leichte Aufwölbungen. Mittels Abklopfen sind Hohlräume akustisch wahrnehmbar. Das Gesteinsgefüge unterhalb der dünnen Schalen ist stets stabil.	
B_2_05_Schalenbildung > 0,3 cm Dicke Schalen > 0,3 cm sind eine großflächige Ablösung von in sich festen flächigen Stücken in mind. 3 mm Schichtdicke. Mittels Abklopfen sind Hohlräume akustisch wahrnehmbar. Dicke Schalen bilden sich mit stabilen und instabilen Untergründen. Ob ein Zusammenhang mit der geologischen Schichtung besteht, ist nicht eindeutig zu bestimmen.	

B_2_06 Schalenbildung nicht definierter Dicke Mehrlagige Schalen sind mehrfach hintereinander gestaffelte Ablösungen, die sich wie geschichtete Blätter unterschiedlicher Dicke darstellen. Stellenweise gehen die Schadensphänomene Abschuppen und mehrlagige Schalen ineinander über.	
B_2_07 Blasenbildung, Aufwölbung (Beschichtung) Blasenbildung äußert sich in Ablösungen der Beschichtung vom Untergrund, dabei entstehen rund-ovale Aufwölbungen (Blasenform). In der Folge zeigt sich an der Oberfläche das partielle Auf-und Abplatzen der Beschichtung.	
B_2_08 offene/defekte Fugen Die Fuge ist der Zwischenraum zwischen den Steinen, der für die strukturelle Integrität, die Wetterbeständigkeit und ästhetische Aspekte des Mauerwerks von entscheidender Bedeutung ist. Offene und defekte Fugen treten auf, wenn dieser Zwischenraum beschädigt ist und das Material herausfällt oder zerbröckelt.	

B_3_0_Materialverlust	
B 3.1 Fehlstellen Hiermit werden fehlende Teile des Objektes benannt, die entweder durch äußere Einwirkung bzw. mechanische Beschädigung mit klaren Bruchkanten entstanden sind oder maßgebliche, verloren gegangene Steinsubstanz, die sich durch langanhaltende Verwitterung in abgerundeten Formen darstellt.	

B_4_0_Oberflächenverschmutzung Unterschiedliche Auflagen auf der Oberfläche des Steinmaterials.	
B_4_01_ Algen, Flechte, Moose, Pflanzen Makroskopisch sichtbarer Bewuchs von Flechten, Algen, Moosen, usw. auf den Oberflächen, als auch mikroskopisch erkennbar unmittelbar im oberflächennahen Gestein verankert. Mikroorganismen finden sich vor allem in feuchten geschützten Bereichen. Die Besiedlungsdichte ist je nach Himmelsrichtung unterschiedlich. Die Form der Besiedelung kann schwanken von dünnen Filmen bis zu dicken Kissen und höheren Pflanzen.	

B_4_02_Verschwärzung Verschwärzte Oberflächen stellen sich als – mitunter krustenartige – schwarze Oberflächen dar, wobei die ursprüngliche Oberflächenkontur bei dünnen, schwarzen Krusten i.d.R. noch gut lesbar ist. Schwarze Krusten – in der Regel Gipskrusten, die je nach Wechselwirkung mit den Schmutzpartikeln der Atmosphäre als grau bis schwarze Auflage erscheinen – sind häufig dicker, verunklaren die ursprüngliche Oberflächenkontur und stellen eine spannungsreiche Schicht dar.	

6.8 Modulares Untersuchungsprogramm

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Die eingangs formulierten Untersuchungsmethoden für das MODUL: ERKENNEN (vgl. Kap. 6.2) wurden im Rahmen des Projektes an den jeweiligen Objekten erprobt und evaluiert. Ziel dieses Moduls ist die Formulierung eines standardisierten Untersuchungsprogramms, um die Art und den Umfang der Schädigung von Objekten aus Baumberger Kalksandstein, die durch mögliche frühere Hydrophobierungsmaßnahmen belastet sind, systematisch zu erfassen.
Hierdurch soll zum einen eine vergleichbare Erfassung aller betroffenen Objekte erreicht werden, was eine systematische Informationsgrundlage zur Fragestellung des Umgangs mit diesen Objekten ermöglicht. Zum anderen stellt diese strukturierte Zustandserfassung die Grundlage für den nächsten Schritt der Konzeption und Entwicklung adäquater Erhaltungsmaßnahmen dar und ermöglicht so standardisierte und nachhaltige Erhaltungsstrategien, die den langfristig wirksamen Schutz der Denkmäler unterstützen sollen.
Darüber hinaus ist im Nachgang durchgeführter Maßnahmen die Kenntnis der Ausgangssituation und das Maß der Vorschädigung entscheidend, um die langfristige Wirkung der durchgeführten Maßnahmen bewerten und ein individuell angepasstes Monitoring und Wartung durchführen zu können. Diese Ausgangssituation kann systematisch durch das Modulare Untersuchungsprogramm erfasst werden.
Dieses modulare Untersuchungsprogramm zur Erfassung der Schäden ist ein wichtiger Baustein des praxisorientierten Leitfadens zum Umgang mit Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein.

MODULARES UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

a. Restaurierungsgeschichte erfassen
b. Qualitative und quantitative Feststellung früherer Maßnahmen
c. Erfassung und Zuordnung der Schadensphänomene
d. Perkussions-Untersuchungen zur Detektion von Hohlstellen
e. Benetzen der Objektoberfläche mit Wasser-Sprühnebel
f. Tropfenaufsetzmethode
g. Messung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme mittels Karsten-Röhrchen
h. Bohrwiderstandsmessungen zur Erstellung von Festigkeitsprofilen
i. Probenentnahmen für begleitende naturwissenschaftliche Untersuchungen
    1. Mikroskopische Gefügeanalyse
    2. Salzanalyse

6.9 Kartierungsglossar

(Friederike Funke, Kirsti Krügener, Birte Graue, LWL-DLBW)

Anhand der an den Objekten festgestellten Schadensphänomenen, die im Schadenskatalog festgehalten sind, wurde das Kartierungsglossar als Grundlage für die im Projekt durchgeführten Kartierungen erstellt. Er soll zukünftig eine einheitliche Kartierung der Objekte aus Baumberger Kalksandstein unterstützen.

BESTAND

A_1_0_ Ursprüngliche Substanz		**RGB-Farbraum**
A_1_01_Werkstein - Baumberger Kalksandstein		150,70,5
A_1_02_Werkstein - Andere		145,210,80
A_1_03_Ziegel		255,200,35
A_1_04_Fuge		50,215,60

A_2_0_ Frühere Maßnahmen		**RGB-Farbraum**
A_2_01_Steinergänzung - Vierung		0,0,255
A_2_02_Steinergänzung - Mörtel		255,0,255
A_2_03_Metall (Anker/Dübel/Klammer)		0,0,0
A_2_04_Reste von Klebstoffen		65,225,210

Anm.: Silikonharzbschichtung (Lasur) und Silikatische Beschichtung werden als Bestand textlich beschrieben und nicht mit der Kartierung lokalisiert, da es sich meist um einen flächigen Gesamtauftrag handelt.

ZUSTAND

B_1_0_ Risse		**RGB-Farbraum**
B_1_01_Risse		255,0,0
B_1_02_Rissnetz		160,100,200
B_2_0_ Ablösung		
B_2_01_Abmehlen/Absanden		255,255,0
B_2_02_Abschuppen		255,155,0
B_2_03_Mürbzone (Aufblättern)		255,0,0
B_2_04_Schalenbildung > 0,3 cm		190,220,235
B_2_05_Schalenbildung < 0,3 cm		100,255,255
B_2_06_Schalenbildung nicht definierter Dicke		0,0,255
B_2_07_Blasenbildung, Aufwölbung (Beschichtung)		255,200,255
B_2_08_offene/defekte Fuge		0,190,80
B_3_0_ Materialverlust		
B_3_01_Fehlstelle		255,0,255
B_4_0_ Oberflächenverschmutzung		
B_4_01_Algen, Flechte, Moose, Pflanzen		150,210,80
B_4_02_Verschwärzung		0,0,0
B_4_03_Salze	+ + + +	50,90,170

UNTERSUCHUNGEN

B_5_0_ Messungen		**RGB-Farbraum**

B_5_01_Wasseraufnahme mittels Karsten'schen Prüfröhrchen	● mit Beschriftung	0,50,200
B_5_02_Tropfenaufsetzmethode	◆ mit Beschriftung	0,0,0
B_5_03_Bohrwiderstandsprüfung	● mit Beschriftung	255,190,0
B_5_04_Ultraschallmessung	■ mit Beschriftung	0,0,0
B_5_05_Probenentnahme	X mit Beschriftung	230,160,95

MASSNAHMEN

C_1_0_ Reinigung		**RGB-Farbraum**
C_1_01_Oberflächenreinigung		145,210,80
C_1_02_Reduktion Kruste		0,0,0
C_2_0_ Sicherungsmaßnahmen		
C_2_01_Entfernung abgängiger Mörtel		255,0,255
C_2_02_Abnahme abgängiger Schalen/Schuppen		1,255,255
C_2_03_Entfernung defekter Dübel/Klammern	▲ mit Beschriftung	185,0,10
C_2_04_Ausräumen defekter Fuge		0,180,85
C_3_0_ Festigung		
C_3_01_Strukturelle Festigung		255,255,0
C_4_0_ Ergänzung		
C_4_01_Rissinjektion		255,0,0
C_4_02_Schalenhinterfüllung		255,0,0
C_4_03 Anböschung		0,255,0
C_4_04_Klebung	■ mit Beschriftung	0,0,0
C_4_05_Vernadelung	● mit Beschriftung	100,255,255
C_4_06_Mörtelergänzung		255,0,255
C_4_07_Vierung		0,0,255
C_4_08_Steinaustausch		0,120,50
C_4_09_Neuverfugung		255,155,0
C_5_0_ Beschichtung		
C_5_01_Kalkschlämme		155,190,80
C_5_02_Silikonharzbeschichtung (Lasur)		255,205,255
C_5_03_Silikatische Beschichtung		255,255,0

6.10 Umsetzung des Moduls anhand der Musterfläche

Die im MODUL : ERKENNEN erarbeitete Struktur und Ergebnisse wurden an der Musterfläche des Pfeilers auf Haus Stapel, Havixbeck angewendet.

6.10.1 Objektdatenblatt

(Friederike Funke, LWL-DLBW)

Objektbezeichnung	Haus Stapel, Pfeiler Vorburg Seitentor, Nord	
Adresse	Gennerich 18, 48329 Havixbeck Kreis Coesfeld	
Standort Besonderheit	Privatgelände. Zugänglich nach Absprache.	
Klara-ID	269295	

Abb. 127: *Seitentor Nord, Außenansicht, Zwischen Vorburg Nordflügel und Herrenhaus (roter Rahmen).*

Frühere Maßnahmen	1985-1987, 2017-2019
Zustand	Risse, Abmehlen, Abschuppen, Schalenbildung < 3 mm Schalen nicht definierter Dicke, offene Fugen, Fehlstellen, Oberflächenverschmutzung.
Kategorisierung	Hydrophobiert mit Schäden.
Aktueller Status	Restaurierung der Musterfläche am rechten Torpfeiler nach modularem Praxisleitfaden umgesetzt und in ein Monitoringprogramm aufgenommen. (2023)

Thema	Bearbeitung	Datum
Recherche: Objektgeschichte	Fu	Aug 2019

Zusammenfassung der relevanten Informationen zur Objektgeschichte:
„Herrenhaus über trapezförmigem Grundriss in einem nördl. verfüllten Hausteich. Backsteinbau auf hohem gewölbtem Kellergeschoß mit dreigeschossigem Turm an der Südwestecke und achteckigem Treppenturm mit Neurenaissanceportal an der Nordseite. Um 1800 ein ehem. rechtwinkelig anschließender Nordflügel abgebrochen. Farbigkeit durch sog. Specklagen Mauerwerk, Wechsel von horizontalen Back- und Hausteinstreifen zwischen Gesimsen aus Werkstein."
- Quelle: Georg Dehio, Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Nordrhein-Westfalen II, Westfalen. Berlin, München 2011 *(Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler).* -

Objektakten LWL-DLBW Münster / Archiv der Restaurierungsdokumentation LWL-DLBW:
1719
vollendete dreiflügelige Vorburg mit zentralem Torhaus. Die Vorburg umschließt den Hof in symmetrischer Ausrichtung auf das turmgekrönte, stark gegliederte Torhaus.

1818-1828
„ . . . Für den Bau des Schlosses 1818-1828 den gutseigenen Steinbruch restlos erschöpft . . ."
Anmerkung von Frhr Raitz von Frentz im Schreiben an den Landeskonservator vom 9.8.1968

1971-1972
Maßnahme „Wiederherstellung der Satteldächer der Vorburg"
Im Bauabschnitt 1971 wurden der Torturm mit den Seitentürmen der Vorburg wiederhergestellt. Im Verwendungsnachweis vom 8. Mai 1972 sind Klempner-, Zimmerer-, Dachdecker- und Malerarbeiten aufgeführt.

1984
Jan Ortstermin . . ."*Vorgesehen ist die Restaurierung der Vorburg durch Firma Fark . . . Amtsrestaurator Sigrist macht den Vorschlag die wesentlichen Gestaltungselemente, wie Wappenkartusche und Vasen, von Restaurator Worch restaurieren zu lassen . . ."*

1985
Im Frühjahr die Vorlage einer Planung für Baumaßnahmen für 1985-1987 zur Beantragung von Zuschüssen. Die Planung sieht vor mit der Sanierung der Vorburg zu beginnen.

Okt Ortstermin . . ." *Amtsrestaurator Sigrist notiert den schlechten Zustand des Mittelrisalits, insbesondere des Wappenreliefs und der Uhr . . . schlägt vor die abgeplatzten Teile mit Epoxidharz zu sichern und die Risse nach der Festigung zu schließen. Die linke Seite des Torhauses ist zu diesem Zeitpunkt bereits fertig restauriert und die Laterne teilweise erneuert . . ."*

1986
Anschreiben vom 14.11.1986 von Hans-Jürgen Brandt Architekt, Münster, mit Auflistung aller geplanter und durchgeführter Arbeiten im Antrag für die Gewährung von Zuwendungen für das Jahr 1988 im Rahmen des Denkmalförderungsprogramm 1985-1986 des Landes NW:
„1985 – Arbeiten an der Vorburg
1986 – Arbeiten an der Vorburg und Abschluß der Arbeiten an der Vorburg"

2017
Fassadenuntersuchung/Konzepterstellung Haus Stapel, Torhaus durch Fa. Wennemer Steinrestaurierung - Steinmetzbetrieb, Münster, 23.11.2019
„Die Schadensphänomene sind typisch für Baumberger Kalksandstein. Häufig beginnen die Schäden mit der strukturellen Entfestigung, in dessen Folge der Stein absandet und abschuppt. In dem Zusammenhang entstehen auch Hohlstellen, Schalen und Risse. Sie sind in diesem Fall verstärkt durch die Hydrophobierung und Oberflächenverdichtung entstanden. Am Ende der Verwitterung steht dann ein größerer Materialverlust, der sich durch Ausbrüche und starke Rückverwitterung bemerkbar macht. Die Fugen sind zu einem großen Teil desolat und liegen offen. Einige Eisendübel rosten und haben den Stein geschädigt. Der Umfang der Schäden, speziell der Verwitterungsbedingten, ist groß. Statische Probleme sind nicht erkennbar."

Restaurierung der Natursteinelemente im Dachbereich, Fa. Wennemer, Steinrestaurierung – Steinmetzbetrieb, Oktober-November 2017:
Restaurierte Teile: Dachvasen mit Postamenten, Wandflächen zwischen den Dachkuppeln, seitliche Dachfenster am Mittelteil und die Laterne
Maßnahmen: Schonende Reinigung (Heißdampf bei geringen Druck), Festigung mit Kieselsäureester (KSE 100 oder KSE 300E), Nachwaschen mit einer Verdünnung V101, Verfüllung von Rissen und Hohlstellen mit einem mineralischen Injektionsmörtel und Aufbringung eines schützenden Deckmörtels, Aufbringen einer mineralischen Schlämme, Ergänzungen mit einem mineralischen Steinersatzmörtel an einigen Fehlstellen, Austausch von Naturstein (Wassernasen der Wandfläche, Ersatz in BKS, Befestigung mit Edelstahlgewindestangen, Epoxidharz, Kleber auf mineralischer Basis), Klebung von losen Steinteilen (punktuell mit Epoxidharz, größere Flächen zusätzlich mit Edelstahlgewindestangen, Fugen ggf. mit mineralischem Deckmörtel geschlossen), Erneuerung der Fugen (Entfernen der alten Fugen, Neuverfugung mit einer Mischung aus 24RT Mauersand 0,1 mm, 6RT Otterbeiner NHL5 Kalk, 1RT Trasszement, 1RT Weißzement)

2019 ff.
Restaurierung der Fassade des Torhauses von allen vier Seiten durch Fa. Wennemer, Steinrestaurierung – Steinmetzbetrieb

2023
Umsetzung der Musterfläche durch Fa. Wennemer, Steinrestaurierung – Steinmetzbetrieb

Archiv der Restaurierungsdokumentation LWL-DLBW:
Keine Maßnahmen für die Fassade benannt

Dienstnachlass Amtsrestaurator Kurt Schmidt-Thomsen:
Keine Maßnahmen für die Fassade benannt

Bildarchiv LWL-DLBW:
Fotographien aus den Jahren:
Unbekanntes Datum (GDV 9 1, GDV 9 5, GDV 9 23, GDV 9 24)
1892-1985: Diverse Bilder ohne Inventarnummer (Ludorff 1892, Pohlschmidt, Werland, Savio, Hauß 1932)
1986: Fotos ohne Inventarnummer, erstellt von Eberhard Worch, Zustand des Torhauses vor und nach der Restaurierung 1986, vor allem vom Wappenfeld
1986 (BA 86/883)

1987 (BA 87/1456-BA 87/1462)
2006, 2008, 2017, 2019

Planarchiv LWL-DLBW:
1941 Die Vorburg, Ansicht von Osten, M1:100
1941 Die Vorburg, Hofansicht von Westen, M1:100
1941 Der Torbau der Vorburg, Hofansicht und Schnitt, M1:50

Bildarchiv Foto Marburg:
1 Aufnahme aus dem Jahre 1921, Bilddatei-Nr. fm625395;
2 Aufnahme aus dem Jahre 2008/09, Bilddatei-Nr. fmd447456, fmd447458.

Literatur:
Georg Dehio, Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Nordrhein-Westfalen II, Westfalen. Berlin, München 2011.

6.10.2 Zustandskartierung

(Friederike Funke, Michael Peren, Wolfram Zalberg, LWL-DLBW; Robert Wennemer)

Der Pfeiler weist verschiedene Schäden auf. Dabei handelt es sich um verwitterungsbedingte Schäden und Beschädigungen von außen. Die Schäden finden sich überwiegend an der Basis und am Mittelteil. Die Pfeilerabdeckung ist weniger stark betroffen.
Es finden sich folgende Schäden:

- Risse/Rissnetze
- Abmehlen/Absanden
- Abschuppen/Mürbzone (Aufblättern)
- Schalenbildung und abgängige Schalen (von > 0,3 cm, < 0,3 cm bis zu nicht definierter Dicke)
- Offene/defekte Fugen
- Materialverlust/Fehlstellen
- Oberflächenverschmutzung (Algen, Flechten/Moose/Verschwärzung/Salze)

Verwitterungsbedingte Schadensphänomene finden sich häufig in Kombination miteinander. Absandungen gehen z.B. in Abschuppung oder Risse über. Fehlstellen finden sich verwitterungsbedingt oder als Folge von äußerer Einwirkung. Die Fugen sind zu einem großen Teil ausgewittert oder sandig. In witterungsgeschützten Bereichen unter der Pfeilerabdeckung finden sich schwarze Krusten. Die Krusten haben zu Spannungen geführt und Schäden wie Schalen und Risse am Stein verursacht. Rostende Eisenklammern haben zu Rissen geführt.
Hochfeste Mörtel, die als Ergänzungsmasse verwendet wurden, sind vollständig desolat. Die Mörtel sind abgerissen und verfärbt. Die neuzeitlichen festen Fugenmörtel sind in gleicher Weise rissig und entfärbt. Eine ausgeprägte biogene Besiedlung aus Algen, Moosen und Flechten findet sich auf der gesamten Steinoberfläche und wurde in der Kartierung auf Grund des flächigen Vorkommens nicht aufgeführt.
Perkussions-Untersuchungen zur detektierten Hohlstellen (Schalen) sind anhand der Kartierung ablesbar.

6.10.2.1 Torpfeiler Nordseite

6.10.2.2 Torpfeiler Südseite

6.10.2.3 Torpfeiler Westseite

6.10.3 Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen

(Robert Wennemer)

Die Ermittlung der Wasseraufnahme soll Erkenntnisse zum Wasseraufnahmeverhalten der Oberfläche liefern. Teilweise lassen sich Aussagen zu möglichen Hydrophobierungen treffen die anhand der Restaurierungsgeschichte angenommen werden können, aber für diesen Bauabschnitt nicht dokumentiert sind.

Verfahren:
Die kapillare Wasseraufnahme wurde mittels Prüfröhrchen nach Karsten, mit einem Durchmesser von 2,0 cm, gemessen. An den zur Untersuchung ausgewählten Bauteilen wurden Vergleichsmessungen an geschädigten und ungeschädigten Oberflächen vorgenommen. Die Auswertung der Messungen erfolgt über den Vergleich der Gesamtwasseraufnahme nach 30 Minuten. Es wurden 2 Bereiche untersucht.
Die Messergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

Tab. 57: *Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen, Messpunkt M1, Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Ostseite.*

Messung Nr. M1		**Datum:** 23.09.2022 **Bearbeiter:** Robert Wennemer Rest. M.A.
Objekt: Haus Stapel/Havixbeck		**Objektbereich:** Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Ostseite
Beschreibung Testfläche: Oberfläche aufgeraut, leicht zurückgewittert, gereinigt, keine Risse, keine Schalen, keine biogene Besiedlung		
Testbedingungen: Testflüssigkeit: Aqua dest., Wetter: trocken und sonnig, Untergrund trocken		
Zeit **[mm:ss]**	***Menge*** **[ml]**	**Foto Testfläche**
0:00	**0,00**	
1:00	**0,20**	
2:00	**0,30**	
3:00	**0,50**	
4:00	**0,70**	
5:00	**0,90**	
6:00	**1,10**	
7:00	**1,40**	
8:00	**1,60**	
9:00	**1,80**	
10:00	**2,00**	
15:00	**2,20**	
20:00	**2,40**	
25:00	**2,60**	
30:00	**2,80**	
45:00	**3,00**	
60:00	**3,10**	

Tab. 58: *Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen, Messpunkt M2, Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Ostseite.*

Messung Nr. M2	**Datum:** 23.09.2022 **Bearbeiter:** Robert Wennemer Rest. M.A.
Objekt: Haus Stapel/Havixbeck	**Objektbereich:** Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Nordseite

Beschreibung Testfläche:
Oberfläche intakt, gereinigt, keine Schalen, keine biogene Besiedlung

Testbedingungen:
Testflüssigkeit: Aqua dest., Wetter: trocken und sonnig, Untergrund trocken

Zeit **[mm:ss]**	***Menge*** **[ml]**	**Foto Testfläche**
0:00	**0,00**	
1:00	**0,00**	
2:00	**0,00**	
3:00	**0,00**	
4:00	**0,00**	
5:00	**0,00**	
6:00	**0,00**	
7:00	**0,00**	
8:00	**0,00**	
9:00	**0,00**	
10:00	**0,00**	
15:00	**0,00**	
20:00	**0,00**	
25:00	**0,00**	
30:00	**0,00**	
45:00	**0,00**	
60:00	**0,00**	

Diagr. 58: *Auswertung der Messergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten.*

Interpretation:
Die Messungen ergaben eine stark unterschiedliche Wasseraufnahme der beiden Messstellen. Die Messung M1 wies eine sehr hohe Wasseraufnahme auf. Diese ist auch im Vergleich zu den Messungen der weiteren innerhalb des Projektes vermessenen Objekten sehr hoch. Die Messung M2 zeigte im Gegensatz dazu gar keine messbare Wasseraufnahme. Selbst nach 60 Min. gab es keine Veränderung und die Messung wurde abgebrochen.

Fazit:
Die starken Unterschiede weisen auf die große Inhomogenität der Oberflächen an dem Pfeiler hin. Hydrophobe Oberflächen wechseln sich mit hydrophilen Bereichen ab. Die hohe Wasseraufnahme der Messung M1 ist nach den bisherigen Messungen an Vergleichsobjekten ungewöhnlich hoch. Dies muss bei der Umsetzung der Restaurierungsmaßnahmen im Bezug zum Materialeinsatz beachtet werden.

6.10.4 Quantitative chemische Salzanalyse

(Frank Schlütter; IWT-Leibniz/MPA Bremen. Markus Rüße; LWL-DLBW)

Wie in Kapitel 6.5.3 beschrieben, wurden die Salzkonzentrationsanalysen durch das Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, Hamburg (Arbeitsgruppe Dr. Steiger), durchgeführt. Proben wurden getrocknet, gemahlen, homogenisiert und 500 mg in 25 ml bidestilliertem Wasser gelöst. Die Analyse von Anionen (Chlorid, Sulfat, Nitrat) erfolgte mittels Ionenchromatographie, von Kationen via ICP-OES; Natrium und Kalium bei Bedarf mit AAS. Salzgehalte wurden als Masseanteil und molare Equivalentkonzentrationen, zur direkten Vergleichbarkeit und Prüfung der Analysevollständigkeit, angegeben.

Tab. 59: *Probenbezeichnungen, Beschreibungen, Aufgabenstellungen und Untersuchungsmethoden*

Objekt	Proben-Bezeichg.	Beschreibung	Aufgabenstellung	Untersuchungs-methode
Haus Stapel, Torpfeiler	**HSt-1**	Bohrmehlproben (4 Segmente)	Quant. chem. Salzanalysen	IC / ICP-OES
	HSt-2	Bohrmehlproben (4 Segmente)		

6.10.4.1 Entnahmeprotokoll und Auswertung

In den folgenden Protokollen werden die Entnahmeobjekte, Entnahmestellen und Ergebnisse der quantitativen chemischen Salzanalyse aufgeführt.

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter: F. Schlütter /M.Rüße

Datum: 20.07.2022

Befund-Nr.: **HSt 1**

Ort: Haus Stapel
Gennerich 18
48329 Havixbeck

Probenentnahmestelle:
Schuppender Bereich an der rechten Randzone des Werksteins

Objekt:
Torpfeiler, unterer Abschnitt (3 Mauerschicht von unten)

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Stapel	**HSt 1**	0-3 mm	1,50	0,32	0,12	0,44	0,04	0,03	0,01	0,81	9,6	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			312	51,5	34,1		18,8	7,9	8,1	405	398	440

Bemerkung: mäßig bis hohe Gipsbelastung

PROBENENTNAHME/AUSWERTUNG

Quantitative chemische Salzanalysen

Bearbeiter: F. Schlütter /M.Rüße

Datum: 20.07.2022

Befund-Nr.: **HSt 2**

Ort: Haus Stapel
Gennerich 18
48329 Havixbeck

Probenentnahmestelle:
Schuppender Bereich am Übergang zur Werksteinvierung

Objekt:
Torpfeiler, mittlerer Abschnitt (5 Mauerschicht von unten)

Probenart:
Bohrmehlprobe (4 Segmente)

Methode der Probennahme:
Bohrung ∅10 mm

Ergebnisse:

Objektort	Profil		Anionen [M-%]				Kationen [M-%]				pH	
	Bhrg	Segm.	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Σ_{Ni+Cl}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}		
Haus Stapel	**HSt 2**	0-3 mm	0,61	0,13	0,10	0,23	0,02	0,02	<0,01	0,46	9,9	
			Anionen [meq/kg]				**Kationen [meq/kg]**				**Summe**	
			SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	A	K
			126	21,5	28,9		10,7	4,5	3,3	230	176	249

Bemerkung: mäßig bis hohe Gipsbelastung

6.10.4.2 Zusammenfassung und Interpretation Auswertungen

Die Salzanalysen schlüsseln sich in die Werte zum Salzgehalte in M-%, sowie die zugehörigen Ionenequivalente und die Anionen/Kationen-Bilanzen auf. Bei der Interpretation muss zwischen schwer löslichem Gips und leicht löslichen Nitraten und Chloriden unterschieden werden. Leicht lösliche Sulfate sind nicht enthalten, weil das gesamte Sulfat als Gips gebunden ist (s. Ca- und Sulfatbilanzen). Die Nitrat- und Chloridgehalte sind als Analysewerte separat aufgeführt.

Haus Stapel (Torpfeiler)

Die Gipsgehalte liegen zwischen 0,6 und 1,5 M-% (mäßig bis hoch belastet), die Nitrat/Chlorid-Mengen betragen 0,2 bis 0,4 M-%.

7. MODUL : HANDELN

(Birte Graue; LWL-DLBW)

Im MODUL : HANDELN sollen Sanierungsmaßnahmen für Objekte aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein entwickelt werden, die einen langfristigen Erhalt der Objekte unterstützen.
Im Rahmen des Projektes werden 29 Objekte in Westfalen erfasst (vgl. **Tab. 3**, Kap. 3), an 13 ausgewählten Objekten werden während der Projektlaufzeit Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt, von der LWL-DLBW fachlich begleitet und im MODUL : HANDELN erfasst (vgl. **Tab. 60**).
Auf Grundlage der Evaluierung früherer Maßnahmen werden Methoden und Materialien auf ihre langfristige Wirkung betrachtet, wobei diese Bewertung durch den überbrachten Erhaltungszustand stark beeinflusst wird.
Festzustellen ist, dass früher durchgeführte Maßnahmen und insbesondere die verwendeten Materialien einen hohen Einfluss auf die Konzeption aktueller Maßnahmen haben. Insbesondere bei Hydrophobierungsmaßnahmen früherer Restaurierungen muss nicht nur der Aspekt der Inhomogenität in Bezug auf das Wasseraufnahme- und Transportverhalten sowie eine im besonderen Maße ausgeprägte Hydrophobie des historischen Natursteinbestands berücksichtigt werden, sondern auch die Kompatibilität früher verwendeter Materialen mit den aktuellen Restaurierungsmaterialien sichergestellt sein, um Schäden zu vermeiden und langfristigen Schutz erreichen zu können. Hier zeigt sich, dass eine differenzierte Herangehensweise an die restauratorischen Konzeptentwicklungen für figuralen Bereiche auf der einen Seite und Werksteinbereiche auf der anderen Seite zielführend ist.
So werden zwei Restaurierungsbeispiele musterhaft hervorgehoben, um Restaurierungsschritte an figuralen Bereichen/Skulptur zum einen und an Werksteinbereichen zum anderen zu zeigen. Im Rahmen des Projekts wird an auf Haus Stapel an einem Torpfeiler eine Musterfläche angelegt.

Tab. 60: *13 ausgewählte Objekte, an denen Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt wurden.*

lfd. Nr.	Objekt-Kürzel	Ort	Objekt	HANDELN
1	Ah-a	**Ahaus**	**Schloss Ahaus,** Löwenportal	• Musterrestaurierung/Anlage Musterfläche
2	Al	**Ahlen**	**Stadtpark Ahlen,** Kreuzigungsgruppe	• Restaurierungsmaßnahmen
3	HSB	**Borken-Weseke**	**Haus Schmeing,** Fensterlaibung	• Restaurierungsmaßnahmen
4	HS-a	**Havixbeck**	**Haus Stapel**, Vorburg Seitentor, Nord	• Musterfläche Werkstein/Musterrestaurierung
5	HA-c	**Horstmar**	**Haus Alst** - Wappensteine	• Restaurierungsmaßnahmen
6	MP-a	**Münster**	**Kirche St. Petri** Bauzier/Adler im Chor	• Restaurierungsmaßnahmen
7	MP-b	**Münster**	**Kirche St. Petri** Westportal/linkes Kapitell	• Restaurierungsmaßnahmen
8	MS-a	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel, Ostfassade,	• Restaurierungsmaßnahmen

lfd. Nr.	Objekt-Kürzel	Ort	Objekt	HANDELN
			Risalit, freistehende Dachvase,	
9	MS-b	**Münster**	**Schloss Münster**, Südflügel Ostfassade, Risalit	• Restaurierungsmaßnahmen
10	MS-c	**Münster**	**Schloss Münster,** Mittelrisalit, Figurengruppe	• Restaurierungsmaßnahmen
11	BT-M	**Telgte**	**An der Marienlinde,** Bildstock	• Restaurierungsmaßnahmen
12	AV	**Vreden**	**Alte Vikarie,** Portal	• Restaurierungsmaßnahmen
13	KV	**Vreden**	**Am Kalvarienberg,** Wegkreuz	• Restaurierungsmaßnahmen

7.1 Systematisierung der erfassten früheren Maßnahmen

Auf Grundlage der Erfassung und Systematisierung früherer Maßnahmen – Applikationsmethoden und verwendete Materialien – soll versucht werden, diese in ihrer langfristigen Wirksamkeit zu bewerten, um mögliche Rückschlüsse auf zukünftige Maßnahmen ziehen zu können.
Neben der Bestands- und Zustandsanalyse nach der im Projekt erarbeiteten Systematik „Modulares Untersuchungsprogramm" (vgl. Kap. 6.8) werden an zehn exemplarischen Objekten auch die Applikationsmethoden und verwendete Materialien früherer Maßnahmen – soweit bekannt – als solche erfasst und strukturiert (vgl. **Tab. 61**).

Tab. 61: *Neun beispielhafte Objekte mit Bestands- und Zustandsanalyse*

lfd. Nr.	Objekt-Kürzel	Objekt	Bauteil
1	SH-a	Schloss Harkotten	Skulptur Nepomuk
2	BT-N	Am oberen Emswehr, Telgte	Skulptur Nepomuk
3	BT-Z	Zur Bunten Brücke bei Nr. 81, Ennigerloh-Enniger	Bildstock Gersmann
4	NN-a	Schloss Nordkirchen	Frauentor
5	NN-c	Schloss Nordkirchen	Corps de Logis, Haupteingang, Treppenanlage, 2 Chimären
6	DS-a	Schloss Darfeld	Hauptburg, Galeriebau
7	DS-b	Schloss Darfeld	Skulptur Nepomuk
8	SB-a	Schloss Burgsteinfurt	Utlucht Renaissance-Erker
9	Ah-a	Schloss Ahaus	Triumphportal („Löwenportal")
10	BT-M	An der Marienlinde, Telgte	Bildstock

Anhand der erhobenen Daten lassen sich die früheren Maßnahmen wie folgt unterteilen

1. Strukturelle Festigung
2. Klebung
3. Anbindung durch Hinterfüllen
4. Ergänzungen, Antragungen, Anböschungen
5. Beschichtung, Schutzlasur

Zur Systematik der Materialien lässt sich eine Unterteilung der verwendeten Bindemittelsysteme wie folgt feststellen:

Tab. 62: *Zuordnung verwendeter Bindemittelsysteme früherer Maßnahmen.*

	Bindemittel	Kürzel	Maßnahme
A	Kieselsäureester	KSE	bei 1. struktureller Festigung (wo erfolgt)
B	Polyurethan-Dispersion	PU-Disp.	z.T. in Verbindung mit Kieselsol-Dispersion bei 2. Klebung/Anbindung und 3. Ergänzung/Antragung/Anböschung
C	Kalk, natürlich hydraulischer Kalk (NHL) und dispergiertes Weißkalkhydrat (disp. WKH)	Kalk	bei 2. Klebung/Anbindung und 3. Ergänzung/Antragung/Anböschung
D	Silikonharz	SHarz	Silikonharzschlämme bei 4. Beschichtung/Schutzlasur
E	Kalk	Kalk	Kalkschlämme bei 4. Beschichtung/Schutzlasur

Zur Evaluierung der früheren Maßnahmen werden beispielhaft fünf Objekte ausgewählt, deren Dokumentationen das o.a. Spektrum an verwendeten Materialien wiedergeben und insbesondere die Dokumentation der letzten Restaurierungsmaßnahme eine Nachvollziehbarkeit der verwendeten Materialien ermöglicht (vgl. **Tab. 63**).

Tab. 63: *Objektbeispiele zur Evaluierung der früheren Maßnahmen*

								Zeit von Restaurierungsmaßnahmen unterschiedlichen Umfangs							
Id-Nr.	**Objekt-Kürzel**	**Objekt**	**KLARA ID**	**Bauteil**	**letzte Rest. Maßnahme**	**angewendete Materialgruppe der letzten Maßnahme**	**Beschichtung der letzten Maßnahme**	**1960er**	**1970er**	**1980er**	**1990er**	**2000er**	**2010er**	**Maßnahmen***	**Schädigungsgrad vor der letzten Maßnahme**
1	SH-a	Sassenberg Schloss Harkotten	118586	Skulptur Nepomuk	2002	Akepox; PU-Mörtel; min. Mörtel; PMMA-Motema	Silikonharzlasur		1973	1986		2002		7,00	2
2	BT-N	Am oberen Emswehr, Telgte	34862	Skulptur Nepomuk	2015	KSE; Epoxi; disp. WKH-Injekt. + Anbösch.; min.	Silikonharzlasur	1966		1988	1995*	2007	2015	1,60	1
3	NN-a	Schloßpark Nordkirchen	105710	Frauentor	2016	KSE; Sumpfkalk, NHL 2, disp. WKH	Kalkschlämme (NHL 2)	1960				2000	2016	2,33	1
4	DS-a	Schloss Darfeld, Rosendahl	31988	Galerie-bau	2018	Epoxi, NHL 5; Kalk, disp. WKH	Kalkschlämme (NHL 2)			1985		2009	2018	1,67	2
5	BT-M	Marienlinde, Telgte	69945	Bildstock	2019	KSE; disp. WKH; min. Mörtel;	Silikonharzlasur	1969		1984		2004	2019	1,00	1

***Berechnet nach: Zeit seit der letzten Maßnahmen (anzahl der Jahre nach der letzten Maßnahmen/ Anzahl der Maßnahmen Ende 2023**

7.1.1 Bewertungsindex

Um eine Vergleichbarkeit und eine Bewertung der früheren Maßnahmen zu erlangen, wird eine Bewertungsmatrix aus den vorhandenen Beobachtungen und gewonnenen Messdaten erstellt (vgl. **Tab. 64**). Diese Bewertungsmatrix beinhaltet folgende Bewertungskategorien:

1. Zeit seit der letzten Restaurierungsmaßnahme in Relation zur Gesamtanzahl erfolgten Maßnahmen,
2. Einstufung des Schädigungsgrades vor der letzten Maßnahme,
3. Bewertung der Messdaten zum Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten,
4. Bewertung der aktuellen Schadenserfassung gemäß des im Projekt erstellten Schadenskatalogs,
5. Bewertung der Haltbarkeit der Beschichtung/Schutzlasur,
6. Bewertung der Dringlichkeit einer erneuten Maßnahme.

Kategorien 2–6 werden mit Punkten von 1 bis 3 bewertet, wobei eine geringe Bewertung (1) wie folgt bedeutet:

2. starker Schädigungsgrad vor der letzten Maßnahme,
3. negativ zu wertendes Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten,
4. qualitativ und quantitativ schlechter, aktueller Erhaltungszustand,
5. schlechte Haltbarkeit der Beschichtung/Schutzlasur,
6. hohe Dringlichkeit einer erneuten Maßnahme.

***Tab. 64**: Bewertungsmatrix*

	1	2	Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten [ml] nach 30 Min Oberflächenbeschaffenheit				3	Schadenserfassung 2020 Beispiele (gemäß Schadensglossar Stand 10.3.21)							4	5	6	
Id.Nr.	Zeit seit der letzten Maßnahme (Anzahl Jahre seit der letzten Maßnahme/Anzahl der Maßnahmen) Ende 2023	Schädigungsgrad vor der letzten Maßnahme	Messungs-nummern	stabile Stein-oberfläche	Beschichtung Silikonharz-schlämme	Beschichtung Kalk-schlämme	Messdaten zum Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten	Risse	Absanden	Abschuppen	Schalen	Schichtenspaltung	Fehlstellen	Bio. Bewuchs	Bewertung aktueller Erhaltungszustand (2020)	Haltbarkeit der Schutzschicht seit der Restaurierung	Dringlichkeit einer erneuten Maßnahme (2020)	Bewertungsindex
1	7,00	2	NK-a_01 Nk-a_02		0,60 0,60		2	3	2	2	3	3	2	2	2,43	2	2	6,0
2	1,60	1	Nk-b 01 Nk-b 02 Nk-b 03		0,15 0,05 0,00		3	3	3	2	3	3	3	1	2,57	2	3	5,9
3	2,33	1	NN-a 02 NN-a 03 NN-a 04	1,15 0,40		0,4	2	3	2	3	3	2	3	3	2,71	2	2	5,1
4	1,67	2	DS-a 02 DS-a 03 DS-a 04 DS-a 05	0,50		1,75 2,40 0,65	2	1	1	1	2	2	2	2	1,57	2	1	4,2
5	1,00	1	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	3	3	6,5

Da die einzelnen Kategorien Aussagen in unterschiedlicher Qualität bzw. Verlässlichkeit abbilden, werden sie unterschiedlich gewichtet (vgl. **Tab. 65**). Da die Kategorien 3 – 5 zuverlässig reproduzierbare Daten liefern, wird ihre Bewertung mit dem Faktor 3 versehen. Kategorien 1 und 2 können nur auf Aktengrundlage, die unterschiedlich umfangreiche Dokumentationen beinhaltet, bewertet und deswegen mit Faktor 1 bzw. 2 gewichtet werden.

Tab. 65: *Gewichtung der einzelnen Kategorien*

Bewertungskategorie		Gewichtung
1	Zeit seit der letzten Restaurierungsmaßnahme	**1**
2	Einstufung des Schädigungsgrades vor der letzten Maßnahme	**2**
3	Messdaten zum Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten	**3**
4	aktuelle Schadenserfassung	**3**
5	Haltbarkeit der Beschichtung/Schutzlasur	**3**
6	Dringlichkeit einer erneuten Maßnahme	**3**

Die Summe der Bewertungsprodukte relativ zur Anzahl der Bewertungen stellt den Bewertungsindex dar. D.h. die Produkte der einzelnen Kategorien (1-6) mit ihrer jeweiligen Gewichtung werden addiert und durch die Anzahl (6) der Bewertungen geteilt, um den Bewertungsindex zu erhalten. Dabei bedeutet ein hoher Bewertungsindex eine gute Wirksamkeit der letzten Maßnahme (vgl. **Tab. 69**).

Tab. 66: *Index zur Bewertung der langfristigen Wirksamkeit der letzten Maßnahme*

Index	Bewertung der langfristigen Wirksamkeit der letzten Maßnahme
7,5–6	gute langfristige Wirksamkeit der letzten Maßnahme
5,9–4,3	mäßige langfristige Wirksamkeit der letzten Maßnahme
4,2–2,5	schlechte langfristige Wirksamkeit der letzten Maßnahme

Die Daten und Bewertungskriterien, die hierzu herangezogen werden, erklären sich wie folgt:

Einstufung des Schädigungsgrades vor der letzten Maßnahme

Der Schädigungsgrad vor der letzten Restaurierung bewertet den Vorzustand vor der letzten und nach einer vorherigen Maßnahme. Bei den fünf ausgewählten Beispielobjekten liegen Vorzustandsberichte und Leistungsverzeichnisse für die zuletzt ergriffenen Maßnahmen vor, die einen genaueren Einblick in die Objektgeschichte geben und zur Bewertung herangezogen werden können.

Messdaten zum Wasseraufnahmeverhalten nach Karsten

Das Wasseraufnahmeverhalten wird mit dem Karstenschen Prüfröhrchen an den unterschiedlichen Objektoberflächen gemessen (Werte in ml nach 30 Minuten). Die Beschaffenheit der Oberflächen unterscheidet sich in stabile Steinoberflächen, Beschichtung mit Silikonharzschlämme oder Beschichtung mit einer Kalkschlämme, woraus ein unterschiedliches Wasseraufnahmeverhalten resultiert.

Eine stabile Oberfläche wird hinsichtlich einer gleichmäßigen Wasseraufnahme bewertet, d.h. eine gleichmäßige Wasseraufnahme an unterschiedlichen Messpunkten mit ähnlichen Verlaufskurven steht für eine intakte, homogene Gesteinsstruktur und führt zu einer positiven Bewertung des Wasseraufnahmeverhaltens (3).

Eine Silikonharz-Beschichtung hat eine Vermeidung von Wassereintrag in die poröse Struktur des Naturstein-Objektes zum Ziel. Somit zeigt ein hydrophobes Verhalten gegenüber Wassereintrag eine funktionierende, intakte Beschichtung an, was zu einer positiven Bewertung (3) führt. Wohingegen eine ungleichmäßige Wasseraufnahme eine nicht mehr intakte Silikonharz-Beschichtung verdeutlicht und zu einer schlechteren Bewertung (1) des Wasseraufnahmeverhaltens führt.

Eine Kalkschlämme sollte eine gleichmäßige Wasseraufnahme zeigen. Im Vergleich zur Silikonharz-Beschichtung ist hier die Wasseraufnahme und -abgabe als mineralische Beschichtung erwünscht. Da eine Kalkschlämme i.d.R. als wasseraufnahmefähige Opferschicht wirken soll, wird das Wasseraufnahmeverhalten ähnlich des der intakten, homogenen Gesteinsstruktur gewertet.

Aktueller Erhaltungszustand gemäß des im Projekt erstellten Schadenskatalogs

Als Grundlage dieser Bewertungskategorie dient der im Projekt erstellte Schadenskatalog (vgl. Kap.6.7). Das aktuell vorgefundene Schadensphänomen wird dabei jeweils in Quantität und Qualität bewertet, wobei eine starke Schadensausprägung des jeweiligen Schadensphänomens und ein geringerer Erhaltungszustand eine niedrige Bewertungszahl (1) erhält.

Haltbarkeit der Beschichtung/Schutzlasur

Die Haltbarkeit der Schutzschicht seit der Restaurierung ist durch die makroskopische Betrachtung der Oberfläche festzustellen. Je größer die Beschichtungsverluste sind, desto schlechter ist die Haltbarkeit der Schutzschicht zu werten (1).

Dringlichkeit einer erneuten Maßnahme.

Die Dringlichkeit einer neuen Maßnahme hängt vom aktuellen Erhaltungszustand bzw. der Komplexität (Quantität und Qualität) des aktuellen Schadenszustandes ab und wird bei aktuell gutem Allgemeinzustand entsprechend als nicht dringlich (3) bewertet und entsprechend umgekehrt.

7.1.2 Aussagen zum Bewertungsindex

Betrachtet man die exemplarische Erfassung der fünf Objektbeispiele, so lässt sich anhand der Bewertungsmatrix (vgl. **Tab. 64**) ein Bewertungsindex zwischen 7,5–6 für eine gute langfristige Wirksamkeit der letzten Maßnahme für die Objekte „Skulptur Nepomuk, Sassenberg" (SH-a) mit 6,0 und „Bildstock Marienlinde, Telgte" (BT-M) mit 6,5 feststellen, wobei die Skulptur Nepomuk aus Sassenberg mit 6,0 am unteren Rand des als gut zu bewertenden Bereichs liegt.
Am oberen der als mäßig langfristig zu betrachtenden Wirksamkeit liegt die „Skulptur Nepomuk, Emswehr, Telgte" (BT-N) mit einem Index von 5,9. Ebenfalls im mittleren Bereich liegt der Index (5,1) des Objekts „Frauentor, Schlosspark Nordkirchen" (NN-a).
Einzig die Maßnahme von 2018 am „Galeriebau, Schloss Darfeld" (DS-a) fällt mit einem Index von 4,2 in den Bereich der Bewertung einer schlechteren langfristigen Wirksamkeit der letzten Maßnahme.

Bei der Bewertung früherer Maßnahmen anhand der vorgestellten Bewertungsmatrix lassen sich keine klaren Korrelationen von angewandten Materialien und/oder durchgeführten Maßnahmen zum allgemeinem Erhaltungszustand ziehen. Es wirft die Frage auf, welche Rolle den Intervallen und Häufigkeiten, Quantitäten und Qualitäten vorheriger Maßnahmen zukommt. So ist vielmehr davon auszugehen, dass die Ausführungen der jeweiligen Maßnahme im Zusammenspiel mit weiteren (z.B. einer Festigung morbider Bereich und anschließende Beschichtung) gut aufeinander abgestimmt sein müssen und aktuelle Maßnahmen ein maximales Maß an Kompatibilität zu früher ausgeführten aufweisen müssen.
Diese Evaluierungssystematik macht die Tragweite der Vorgehensweise nach dem Baukasten-Prinzip deutlich: eine enge Abstimmung und ein Ineinandergreifen der auszuführenden Maßnahmen mit untereinander kompatiblen Materialien.

Für eine objektübergreifende – also unabhängig von den bearbeiteten Objekten, statistische Auswertung der langfristigen Wirksamkeit einzelner Maßnahmen dienen die hier vorgestellten „Evaluierung früherer Maßnahmen" und Bewertungsmatrix nicht. Jedoch kann die Bewertungsmatrix auf Grundlage der genauen Bestands- und Zustandserfassung zum einen eine Einschätzung der Schadensursachen unterstützen als auch die langfristige Wirkung von durchgeführten Maßnahmen am jeweiligen Objekt bewerten: sind es insbesondere die inhomogenen Wassertransporteigenschaften des Objekts, die eine weitere Schädigung erwarten lassen oder ist es das Beschichtungssystem, das einer Überprüfung und Bewertung bedarf? Welche Rolle spielt eine Schadsalzbelastung bei der Haltbarkeit von verschiedenen Konservierungsmaßnahmen – von der Festigung über die Antragung bis zur Schlämme? Damit bietet die Bewertungsmatrix die Möglichkeit, mit zukünftigen Maßnahmen zielgerichtet an bestehenden Schwachstellen anzusetzen, wobei für die Planung zukünftiger Maßnahmen auch immer Art und Umfang vorheriger Maßnahmen eine Rolle spielen. Dabei steht die Bewertungsmatrix in engem Kontext mit dem im MODUL : ERKENNEN entwickelten Untersuchungsprogramm (vgl. Kap 6.8).

Konkret heißt dies für das jeweilige, zu bearbeitende Denkmal, dass mittels der Auswertung der Restaurierungsgeschichte und auf Grundlage der im Untersuchungsprogramms erfassten Daten sowie deren Evaluation nach der Bewertungsmatrix Aussagen zur letzten durchgeführten Maßnahme und angewandten Bindemittelsystem sowie den Applikationsmethoden getroffen werden können. Hierauf aufbauend kann in die weitere Planung eingebunden werden, ob das zuvor gewählte Bindemittelsystem und die zuvor ausgeführten Applikationsmethoden zielführend sind und weitergeführt werden sollten oder es eine Änderung – und möglicherweise welche – erfolgen sollte.
Die Evaluierung ermöglicht es, Schädigungsstrukturen zu detektieren und potentielle zukünftige Schädigungen aufzuzeigen. Dadurch können bei der Konzeptfindung für anstehende Maßnahmen geeignete Restaurierungskonzepte im Hinblick auf den Umgang mit durch Althydrophobierung geschädigten Objekte aus Baumberger Kalksandstein differenzierter und zielgerichteter formuliert werden. In Hinblick auf die restauratorischen Konzeptentwicklungen hat die Evaluierung früherer Maßnahmen gezeigt, dass eine Unterteilung von Restaurierungsmaßnahmen an figuralen Bereichen einerseits zu Maßnahmen an Werksteinbereichen andererseits zielführend ist.

Darüber hinaus kann die Evaluierungsmethode als Monitoring-Instrument zur Beurteilung aktueller und zukünftiger Maßnahmen individuell abgestimmt auf das jeweilige Objekt eingesetzt werden. Hier zeigt sich gerade mit Blick auf die Bewertung von Wechselwirkungen und der Feststellung von Kompatibilitäten neuerer und früherer Restaurierungsmaterialien und –methoden eine hohe Relevanz. Dabei kann eine Bewertung dieses Index in Hinblick auf die Einschätzung der langfristigen Wirkung einer zuvor durchgeführten Maßnahme und die Planung aktueller und zukünftiger Maßnahmen erfolgen.
Dadurch können bei der Konzeptfindung für anstehende Maßnahmen geeignete Restaurierungskonzepte im Hinblick auf den Umgang mit durch Althydrophobierung geschädigten Objekten aus Baumberger Kalksandstein differenzierter und zielgerichteter formuliert werden.

7.2 Konzeptentwicklung

(Birte Graue; LWL-DLBW)

7.2.1 Voraussetzungen und Herausforderungen

Die Besonderheit und damit Herausforderung bei der Restaurierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein ist die Inhomogenität der Objektzustände in Hinblick auf hydrophobe und/oder hydrophile Oberflächen, die in sehr unregelmäßigen, mitunter sehr engen Abständen an einem Objekt wechseln. Diese Inhomogenität und die damit verbundenen unterschiedlichen Wassertransporteigenschaften zeigen sich sowohl parallel zur Oberfläche als auch senkrecht zur ihr, also in die Tiefe des Gesteinsmaterials. Hier unterscheiden sich die Wassertransporteigenschaften schichtenweise zur Oberfläche des Gesteines und verstärken den Schadensprozess der Schichtentrennung und damit Schalen- und Schuppenbildung, die ohnehin in dem sehr porösen, schwach gebundenen und Tonmineral-führenden Gestein angelegt sind.
Die Inhomogenität der hydrophoben/hydrophilen Eigenschaften der Oberflächen stellen eine Herausforderung bei Restaurierungsmaßnahmen dar, denn die Materialauswahl muss so getroffen werden, dass eine Haftung und Bindung zu beiden Oberflächen mit gegensätzlichen Eigenschaften möglich ist. So muss beispielsweise eine Bindung zwischen einer hydrophoben, rückseitigen Oberfläche einer Schale an einen hydrophilen Untergrund hergestellt werden und die Haftung des Konservierungsmaterials muss an beide gegensätzliche Oberflächen gegeben sein.

Darüber hinaus sind an den meisten Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein bereits mehrfach Restaurierungsmaßnahmen in ihrer jüngsten Vergangenheit durchgeführt worden. So müssen die ausgewählten Materialien einer aktuellen Maßnahme nicht nur den Aspekt

der hydrophob/hydrophilen Oberflächen bedienen, sondern auch eine Kompatibilität zu verwendeten Materialien früherer Maßnahmen aufweisen. Hier darf es zu keinen negativen Wechselwirkungen kommen und die neu eingebrachten Materialen müssen trotz Vorhandensein früher eingebachter Stoffe ihre erwünschte Wirkung erreichen.

Im Projektverlauf zeigt sich bei der Erfassung und Untersuchung der vielen verschiedenen Objekte, dass für die Entwicklung von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen eine Unterscheidung getroffen werden muss zwischen der Konservierung von bildhauerisch erstellten Objekten aus Baumberger Kalksandstein und der Restaurierung von hauptsächlich steinmetzmäßig bearbeiteten Werksteinen aus dem Natursteinmaterial im Mauerwerksverbund.

7.2.2 Auswahl Restaurierungsmaterialien

Wie zuvor erwähnt, ist die Auswahl der Materialien zur Restaurierung von Baumberger Kalksandstein mit Althydrophobierung in Hinblick auf eine anzustrebende Kompatibilität von aktuellen Materialien zu früher verwendeten stark bestimmt durch das früher verwendete Bindemittelsystem. Die Erfassung der verschiedenen Objekte und vor allem die Evaluierung früherer Maßnahmen zeigen eine Unterteilung der maßgeblich verwendeten Bindemittelsysteme in drei Klassen:

a) Kieselsäureester (KSE),
b) mineralische Massen auf Basis von Kalk/natürlich hydraulischen Kalk – u.U. mit Zusatz Kunstharz,
c) Kieselsoldispersion gebundene Massen mit Zusatz Kunstharz (vor allem Polyurethan- oder Acryldispersionen)
d) Gesondert betrachtet werden können die eine Maßnahme abschließenden Beschichtungssysteme, wobei hier vor allem Kalk-gebundene oder Silikonharz-gebundene Systeme festzustellen sind.

Für aktuelle und zukünftige Maßnahmen im Baukastenprinzip stellen diese Materialien den Materialkanon dar.

7.2.3 Auswahl Restaurierungsmethoden

Die Restaurierung von Objekten aus Baumberger Kalksandstein mit Althydrophobierung kann folgende Arbeitsschritte beinhalten:

- Vorfestigung
- Reinigung
- Salzreduzierung
- Krustenreduzierung
- Abnahme loser Oberflächen
- Strukturelle Festigung
- Verschlämmen von Schuppen und dünnen Schalen und schmalen Rissen
- Klebung von Rissen und Schalen
- Verdübelung von Rissen und Bruchstücken
- Verfüllung von Rissen
- Hinterfüllung von Schalen
- Fixierung gelöster Steinelemente und dicker Schalen
- Anböschung von kleineren Kanten
- Antragung von Bruchkanten
- Mörtel-Ergänzung von Fehlstellen im Naturstein
- Naturstein-Ergänzung von Fehlstellen im Naturstein (Vierung)
- Steinaustausch

- Fugenaustausch/ Fugenertüchtigung
- Beschichtung als Schutzüberzug – z.B. Farbfassung als Schutzschicht
- Beschichtung als Opferschicht – z.B. Schlämme als abschließender Überzug

Eine Anwendung von Materialien in den verschiedenen Arbeitsschritten soll im Baukastensystem erfolgen, d.h. eine Grundrezeptur (vgl. **a-c**) wird modifiziert bzw. die Variation der Materialrezepturen erfolgt auf Grundlage eines Bindemittels. Dadurch wird das Ineinandergreifen der auszuführenden Maßnahmen mit untereinander kompatiblen Materialien gewährleistet.

7.2.4 Konservierungskonzept für bildhauerisch bearbeitete Objekte

(Lale von Baudissin, Rebecca Knapp, Katja Schmeikal, Jeannine Meinhardt; FH Potsdam)

Im Rahmen der Projektbearbeitung werden von Studierenden der Hochschulen in Potsdam und in Köln konservatorische Maßnahmen für bildhauerisch bearbeitete Objekte aus Baumberger Kalksandstein konzeptioniert. Die sogenannten Wappensteine stammen von Haus Alst in Horstmar (**Abb. 128** und **Abb. 129**).

Abb. 128: Westfassade Haus Alst.

Die Wappensteine wurden in einer früheren Maßnahme 2009 aufgrund fortschreitender Schädigung aus dem Mauerwerksverbund ausgebaut und in Kellerräumen des Hauses eingelagert.

Abb. 129: Wappensteine, Haus Alst.

Hier erfolgt durch die Studierenden eine umfängliche Aufnahme und detaillierte Schadenserfassung. In der Diskussion zu den auszuführenden Maßnahmen werden konservatorische gegenüber restauratorischen (u.a. Wiederherstellen früherer Formen) Maßnahmen abgewogen und es wird eine Konservierung der Wappen präferiert.

Tab. 67: *Konservierungskonzept für bildhauerisch bearbeitete Objekte*

Maßnahme	Material	Applikationsmethode
Vorfestigung	KSE 100	durch Fluten der morbiden Zonen (wo nötig)
Reinigung	Wasser	Heißdampfreinigung im Niedrigdruckverfahren
Entsalzung	Cellulose, Bentonit, dest. Wasser	Kompressen-Auflage (wo nötig)
Krusten-Reduzierung	Asilit/Granatsand	Mechanisch mit Spatel und Skalpell, Messingdrahtbürste, Mikropartikelstrahl
Krusten-Reduzierung	Monumentique Paste C	Chemisch mit Ionentauscher, Ammoniumcarbonat
Festigung	KSE 300/500	Fluten oder über Cellulosekompressen
Hinterfüllen	PLMA	Injektion mit Packern und Spritzen
Klebungen	AKEPOX 5010	Punktuelle Fixierung mit Epoxidharz
Verdübelung von Rissen	Akepox 5010, Hilti Hit HY 170 (Hybrid-Injektionsmörtel), Edelstahl	Einlassen und Verkleben von Edelstahlarmierungen in vorgefertigte Bohrlöcher, Verschluss der Bohrlöcher acrylvergütetem Restauriermörtel
Verdübelung von Bruchstücken	Akepox 5010, Hilti Hit HY 170 (Hybrid-Injektionsmörtel), Edelstahl stangen 6- 8mm	Einlassen und Verkleben von Edelstahlarmierungen in vorgefertigte Bohrlöcher, Verschluss der Bohrlöcher acrylvergütetem Restauriermörtel
Anböschungen	A. Kieselsol/Primal m. Gesteinsmehl; oder B. Remmers RM ZF oder pro	Kanten und Bruchstellen werden leicht auslaufend angeböscht
Mineralische Ergänzung	Mineros Festigkeit 1 /2; oder Remmers RM Pro m. Haftgrund	Größere Fehlstellen werden mineralisch geschlossen

Schlämmen	Remmers RM Pro; NHL 3,5/5; Sande; oder Kieselsol/Primal m. Gesteinsmehl	In schuppenden Bereichen Auftrag mit Pinsel und Schwamm, abschließend abkehren

Das Konservierungskonzept für bildhauerisch bearbeitete Objekte (vgl. **Tab. 67**) folgt dem Baukastensystem. Hierbei werden sowohl methodisch als auch materialtechnisch aufeinander aufbauende und sich verschränkende Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen ausgearbeitet (wie beispielsweise: Reinigung, Festigung, Klebung, Hohlraumverfüllung, Antragung, Schlämmauftrag, etc.). D.h. der Baukasten ist als Maßnahmenkette zu verstehen, bei der die im jeweiligen Bedarfsfall anzuwendenden einzelnen Komponenten aufeinander aufbauen bzw. ineinandergreifen.

7.2.5 Konzeption zur Restaurierung von steinmetzmäßig bearbeiteten Werksteinen aus Baumberger Kalksandstein

(Markus Rüße, LWL-DLBW; Robert Wennemer)

Bei der Restaurierung von steinmetzmäßig bearbeiteten Werksteinen im Mauerwerk aus Baumberger Kalksandstein können die konservatorischen Arbeitsschritte des Baukastenprinzips ersetzt oder ergänzt werden.
Neben einer Oberflächenreinigung und möglichen Vorfestigung und Krustenreduzierung kann auch das Abnehmen loser Oberflächen notwendig sein. Über die Verklebung/Verdübelung von Bruchstücken und Rissen, Hinterfüllmaßnahmen und mineralischen Ergänzungen hinaus können auch Natursteinvierungen zum Tragen kommen. Auch bei der restauratorisch-handwerklichen Bearbeitung von Mauerwerksbereichen aus Baumberger Kalksandstein sollte ein Beschichtungssystem als Schutz- und Verschleißschicht dringend in Betracht gezogen werden.
Darüber hinaus steht ein Fugenaustausch oder eine Fugenertüchtigung in aller Regel an. Gerade bei der Neuverfugung zeigt sich aufgrund geringer Wasseraufnahmekapazität des Natursteinmaterials im Zusammenhang mit einer bestehenden Hydrophobie des Baumberger Kalksandsteins die Problematik des Vornässens/Nässens der Fugen.
Auch für den Schlämmauftrag und das Abbinden der Schlämme kann die Hydrophobie des Untergrundes ein Problem darstellen und muss unbedingt bei der Materialkonzeption (ggfls. geringer Acrylharz- oder Hydrauleanteil) beachtet werden.

7.3 Fallbeispiel: Restaurierung an Skulpturen – Kreuzigungsgruppe Ahlen

(Nikolai Hartman von Rüden, Firma Lehmkuhl)

7.3.1 Objektidentifikation

Ort	59227 Ahlen, Stadtpark/ Parkstraße	**Klara-ID.** 5631	
Objekt Kreuzigungsgruppe		**Person / Künstler** Anton Wesselmann	
Objekttyp Freistehende Natursteingruppe	**Formtyp** Neogotik	**Material** Baumberger Kalksandstein	
Ausführung Thomas Lehmkuhl, Dipl.-Restaurator (FH) Nikolai Hartmann v. Rüden, Dipl.-Rest. (FH) Bernd Steinkamp, Steinmetzmeister Waltraud Hustermeier, Restauratorin Rico Zschach, Restaurator Oliver Vos, Restaurator		**Zeitraum** 2020	**Maßnahme Nr.**

Schadbild/Vorzustand	X
Restauratorische Arbeiten	X
Materialliste	X
Protokoll: Schadsalzminderung	
Untersuchungen	X
Voruntersuchungen	
Notsicherung	
Farbuntersuchung	
Kartierung: Schadbild – Vorzustand	
Kartierung: Farbbefund / Probeentnahme	
Kartierung: Restauratorische Arbeiten	
Kartierung: Salzgehaltuntersuchung	
Fotodokumentation	
Der Bericht umfasst 8 Seiten und 49 Fotos.	X

Steinfurt, den 09.12.2020
Ort / Datum

Nikolai Hartmann v.R.
Verfasser

Gegenstand des nachfolgenden Restaurierungsberichtes ist die im Stadtpark / Parkstraße in Ahlen, am Standort des ehemaligen Kamptores, befindliche Kreuzigungsgruppe, die 1901 in neogotischem Stil aus Baumberger Kalksandstein von dem Bildhauer Anton Wesselmann geschaffen wurde.
Die Gesamthöhe beträgt etwa 4,40m; das Kreuz befindet sich auf einem Postament mit Engelsköpfen über einem altarförmig gestalteten Sockel, der Korpus ist vollplastisch gearbeitet. Datum und Künstlername sind als Inschriften dem Sockel zu entnehmen. Auf der Schauseite befindet sich die Inschrift „Es ist vollbracht". Links und rechts des Sockels sind Maria und Johannes in andächtiger Haltung dargestellt; die Figuren sind etwas unterlebensgroß.
Bis zum heutigen Datum haben mehrere Restaurierungen stattgefunden, belegt sind die Maßnahmen von Lamché 1980, Dr. Hellbrügge 1998, sowie Ochsenfarth 2007.

Das heute steinsichtige Werk war ursprünglich farbig gefasst und bis 1980 mehrfach überfasst worden, wurde jedoch 1980 vollständig freigelegt. Die ursprüngliche Farbigkeit ist nicht dokumentiert und heute auch nicht mehr nachvollziehbar.

7.3.2 Vorzustand/Schadensbilder

An dem Objekt sind verschiedene, gravierende Schadensphänomene erkennbar, die zum Teil auf die Beschaffenheit des Steinmaterials (Kalksandstein, hohe Wasseraufnahme, großes hygrisches Quellen durch Tonminerale), größtenteils jedoch auf die Folgen vergangener Restaurierungsmaßnahmen (Hydrophobierung, Beschichtung, Anstriche) im Zusammenhang mit der fortgesetzten freien Bewitterung der Objekte (Wassereintrag, aufsteigende Feuchte, Frost-/Tauwechsel, UV Strahlung, mikrobielle Besiedlung) zurückzuführen sind.

Folgende Restaurierungsmaßnahmen sind belegt:
1980: u.a. Freilegung von Farbschichten, Ergänzungen, Herstellen neuer Arme f. Korpus, Messingarmierungen, Festigung mit Tegevakon und Hydrophobierung mit Silikon Wacker 190S
1998: u.a. Strukturelle Festigung mit Kieselsäureester OH, Sicherung von Rissen und Schuppen mit Paraloid B72, Verpressung der Risse, mineralische und polyurethangebundene Ergänzungen, Silikonharzlasur
2007: (nach Sturmschäden) u.a. Festigung mit Kieselsäureester 300, Verklebung von Bruchstücken mit Steinkleber auf Polyesterbasis, Rissverschluss mit Paraloid B72 gebundenen Massen, zahlreiche Ergänzungen, Silikonharzfarbe flächig aufgetragen.

Schadensgenese:
Die aufgebrachten Hydrophobierungen und Lasuren führten zu einer fortgesetzten irreversiblen Verdichtung der Steinoberfläche, wodurch der Feuchtetransport extrem eingeschränkt wurde. Die durchgeführten Wasseraufnahmetests zeigten, dass in den meisten Oberflächenbereichen keine Feuchtigkeit aufgenommen wird, sondern Wassertropfen auf der hydrophobierten Oberfläche stehen.
Die aus diesem Zustand resultierenden Prozesse führten zu einer flächigen Ausbildung von undurchlässigen Gesteinsschalen von 2-15 mm Stärke an der gesamten Kreuzigungsgruppe. Hinter den Schalen, an Verletzungen der Oberfläche sowie über massive und tiefgreifende Rissbildungen fand jedoch die gesteinstypische hohe Wasseraufnahme statt. In der Folge kam es zu einer vollständigen Durchfeuchtung, da über die verdichtete Oberfläche weder Feuchtigkeit aufgenommen noch abgegeben werden konnte.
Durch die oben genannten Bewitterungsfaktoren im Zusammenhang mit der im Objekt befindlichen Feuchtigkeit erfolgte eine ausgeprägte Entfestigung der Steinsubstanz als bis zu 15 mm starke Mürbzone unter den Gesteinsschalen. Wenngleich die unmittelbare bildhauerische Oberfläche der Figuren noch weitgehend erhalten ist, sind die Substanzschäden darunter drastisch.
Gleiche Schadensprozesse und Phänomene liegen in unterschiedlicher Ausprägung an der Kreuzigungsgruppe wie auch am aufwändig gestalteten Sockel vor. Bodenberührte Bauteile zeigen dabei eine stärkere Durchfeuchtung und somit umfangreichere Schädigungen als die weniger feuchtebelasteten Zonen des Sockels.

Folgende Schadensbilder traten auf:

- Aufliegende Verschmutzungen, biogene Besiedlung durch Moose, Flechten (auch in Rissen)
- Schadhafter Silikonharzüberzüge
- Aufsteigende Feuchte durch zu hoch angelegtes Pflaster
- Schalenbildung, Risse und Abrisse bis hin zum Verlust der Oberfläche

- Bindemittelverlust und Gefügezerstörung unterhalb der Schalen im hydrophilen Bereich bis in die Tiefe des Steins sowie an einigen Oberflächen in Form von Schuppen, Sanden, Mürbzonen
- Starke Rissbildung, teils an früher bereits verklebten Bereichen, Abrisse von Schalen ebenso wie auffällige tiefgehende Risse durch Gefügeentfestigung durch die Mitte der Figuren (Kopf Johannes, Gesicht Mariens)
- Hohlstellen durch Materialverlust an Rissen und Schalen
- Umfassende Fehlstellen
- Sich lösende, teils desolate Altergänzungen, teils Rückwitterung in den angrenzenden Bereichen
- Defekte Klebungen
- Rückwitterung der Oberflächen, insbesondere am Sockel

7.3.3 Zielsetzung/Restaurierungskonzept

Aufgrund der umfangreichen Restaurierungen in den letzten Jahren und dem Einsatz aus heutiger Sicht in Teilen ungeeigneten Materialien war die Umsetzung einer dauerhaften Konservierung der Skulpturen in Form einer „endgültigen" Maßnahme und die Machbarkeit einer anschließenden freien Bewitterung von vornherein fraglich. Zunächst wurde daher ein zukünftig regelmäßiges Monitoring der am ursprünglichen Ort wieder aufzustellenden Figuren erwogen. Nach der intensiven Begutachtung der Figuren in der Restaurierungswerkstatt war jedoch zu konstatieren, dass eine Restaurierung für die Wiederaufstellung bei freier Bewitterung aufgrund der Schwere der vorliegenden Schädigungen aus restauratorischer sowie denkmalpflegerischer Sicht nicht mehr sinnvoll ist. Es wäre mittel- bis kurzfristig von einem vollständigen Verlust der bislang noch überlieferten bildhauerischen Oberflächen auszugehen.
Die nun neu definierte Zielsetzung der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen war nach intensiver Erörterung gemeinsam mit Vertretern der unteren sowie oberen Denkmalbehörden und dem Unterzeichner der Erhalt und Schutz der vorhandenen originalen Substanz hinsichtlich einer zukünftigen Aufstellung im witterungsgeschützten Bereich. Von den originalen Skulpturen sollen zu späterem Zeitpunkt Abgusskopien erstellt werden, die zukünftig am angestammten Standort auf dem altarähnlichen Sockel sowie am Kreuz zu stehen kommen sollen. Darüber hinaus sollte die ursprüngliche originale Skulpturengruppe weiterhin einem breiten Publikum zugänglich sein. Als Standort hierfür ist eine Wandfläche im überdachten Außenbereich vor der Aussegnungshalle vorgesehen.

7.3.4 Durchgeführte konservatorische Maßnahmen

Primäres Restaurierungsziel ist die Sicherung und Festigung der originalen Substanz, die in ihrem Erhaltungszustand gefährdet ist, sowie der bildhauerischen Form und Ästhetik. Nachfolgend sind alle Einzelmaßnahmen in der Übersicht aufgeführt, die bei der Restaurierung zum Tragen kamen:

Restaurierung des Sockels mit Postament und Längsbalken in situ

- Die Steinoberfläche wurde mit Heißwasserhochruckreiniger bei geringem Druck vorsichtig von der biogenen Besiedlung und losen Verschmutzungen befreit. Die Temperastur wurde auf 90°C eingestellt und der Druck auf ca. 20 bar reduziert. Bei der Reinigung wurde darauf geachtet, die Steinoberfläche nicht abzutragen. Besonders hartnäckiger Bewuchs wurde von Hand nachgereinigt.
- Strukturelle Festigung der Mürbzonen und schuppig-schaligen Natursteinbereiche: Eine Stabilisierung mit Kieselsäureethylester war aufgrund der fehlenden Berührungspunkte der Schuppen und Einzelkörner nicht wirksam. An einfachen Werkstückoberflächen erfolgte hier eine Abnahme der nicht mehr zu haltenden Substanz und Neuergänzung mit Restauriermörteln. Im Bereich architektonisch-bildhauerischer Oberflächen wurde eine partielle strukturelle

Festigung mit verdünnten Acrylatdispersionen und mineralischem Deckmörtel nass in nass vorgenommen.

- Die Fixierung von Gesteinsschalen erfolgte mit Injektionsmassen auf Acrylatbasis.
- Tiefe Risse wurden nicht verfüllt, sondern die losen Teile an den Bruchstellen wo nötig, abgenommen, die Rissflanken von Altmaterial, Moosen und Ablagerungen gereinigt und die Risse kraftschlüssig verklebt.
- Verklebung der abgebrochenen Steinteile nach Säuberung der Bruchkanten mit beständigem Epoxidharz für Naturstein mit geringer Vergilbungsneigung. In erforderlichen Bereichen Vernadeln mit Edelstahldübeln. Schließung der Risse an der Oberfläche mit einem mineralischen Deckmörtel.
- Entfernung der alten, desolaten Ergänzungen.
- Ergänzung von Fehlstellen unter Berücksichtigung der Linienführung, der Wasserableitung und der Ästhetik. Rekonstruktionen mit einem auf den Originalbestand angeglichenen mineralischen Restauriermörtel nach Absprache.
- Herstellung und Einbau einer Vierung an der unteren Hälfte der aufwändig profilierten Inschrifttafel an der Schauseite des Sockels.
- Herstellung und Einbau dreier profilierter Vierungen am Sockel erfolgt in Kürze.
- Mechanische Entrostung der Metallstange auf der Rückseite des Kreuzes. Roststellen wurden mit einer Rostgrundierung vorbehandelt und werden mit einem zweifachen Deckanstrich überstrichen.

Restaurierung der Figuren und des Querbalkens

- Provisorische Stabilisierung und Abbau der Skulpturen und Querbalken zur Überführung in die Restaurierungswerkstatt.
- Reinigung (s.o.)
- Vorversuche zur Wasseraufnahme an den Oberflächen.
- Strukturelle Festigung, Fixierung von Gesteinsschalen, Behadlung von Rissen sowie die Verklebung der abgebrochenen Steinteile erfolgte analog der Behandlung des Sockles und des Längsbalkens in situ (s.o.).
- Abnahme gelockerter Altklebungen und kraftschlüssige Neuverklebung.
- Entfernung der alten, desolaten Ergänzungen.
- Ergänzung von Fehlstellen unter Berücksichtigung der Linienführung, der Wasserableitung (relevant f. d. Abgusskopien) und der Ästhetik. Rekonstruktionen am Faltenwurf und den Füßen des Korpus mit einem auf den Originalbestand angeglichenen mineralischen Restauriermörtel nach Absprache.
- Herstellung eines neuen Nagels für den Korpus.
- Der Querbalken des Kreuzes wurde durch einen neuen Querbalken aus Baumberger Kalksandstein ersetzt, um die Verkehrssicherheit zu gewährleisten.

7.3.5 Fotografische Zustandsdokumentation Restaurierung

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Blickrichtung Osten
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	1	
Vorzustand		
Vorzustand der Kreuzigungsgruppe in Ahlen am Stadtpark		

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur des Johannes
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	2, 3, 4	

Vorzustand

Vorzustand in situ, Detail Figur Johannes

Vorzustand

Detail Johannes: Tiefe Risse zeugen von Instabilität trotz noch vorhandener bildhauerischer Oberfläche.

Vorzustand

Detail Johannes: Unterhalb der Beschichtungen bilden sich massive Mürbzonen aus.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur des Johannes
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	6,7,8	

Vorzustand

Vorzustand der Johannes Figur nach der Demontage und dem Transport in die Restaurierungswerksatt.

Vorzustand

Detail Kopf hinten: Ein Teil des Kopfes hat sich durch die Tiefe des Risses gelöst.

Vorzustand

Detail: An den Bruchflächen / Rissflanken hat sich biogener Bewuchs angelagert.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur des Johannes
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	9,10,11	

Vorzustand

Detail: ehemals verklebte oder verfüllte Risse weisen keine Anbindung mehr auf.

Vorzustand

Detail Hand: Die ehemals bereits ergänzte Hand ist abgerissen und in ihrer Form zurückgewittert. Eine Rekonstruktion ist nicht vorgesehen.

Vorzustand

Detail: Unterhalb der Beschichtungen bilden sich massive Mürbzonen aus, deren einzelne Schuppen weit aufblättern und damit keine Berührungspunkte mehr miteinander haben.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur des Johannes
Thema:	Vorzustand/ Zwischenzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	12,13,14	

Vorzustand

Detail: Abgerissene Elemente mussten abgenommen, gereinigt und neu verklebt werden, um kraftschlüssige Verbindungen herstellen zu können.

Zwischenzustand

Detail: Abgenommene Arme, Schulter, Kopf. Zusätzlich zu der Verklebung mussten diese Elemente mit Edelstahldübeln vernadelt werden.

Zwischenzustand

Detail: : Die noch zu festigenden Mürbzonen wurden behandelt, die zu stark aufgeblätterten Bereiche entfernt, da sonst an der gesamten Figur keine Stabilität zu erreichen war. Die abgenommenen Elemente sind hier bereits gereinigt, vernadelt und verklebt.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur des Johannes
Thema:	Zwischenzustand/Endzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	15,16,17	

Zwischenzustand	**Endzustand**	**Endzustand**
Zwischenzustand Johannes während des Verklebens der gerissenen und abgenom-menen Elemente	Gesamtansicht Johannes nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen	Gesamtansicht Rückseite Johannes nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur der Maria
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	18,19,20	

Vorzustand

Vorzustand Marienfigur in der Restaurierungswerkstatt

Vorzustand

Detail: unter der verfestigten Oberfläche haben sich Mürbzonen ausgebildet; das Gesicht ist zudem als Ganzes abgerissen.

Zwischenzustand

Detail: Hinter abgenommenen Elementen wie dieser Gewandfalte sind Schmutzablagerungen, Bewuchs und Ergänzungsmörtel / Rissverschlussmassen zu erkennen. Eine Reinigung der Bruchflanken ist zur kraftschlüssigen Verklebung unabdingbar.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur der Maria
Thema:	Zwischenzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	21,22,23	

Zwischenzustand

Detail: Das Gesicht als Ganzes war abgerissen und musste abgenommen werden.

Zwischenzustand

Detail: Das Gesicht als Ganzes war abgerissen und musste abgenommen werden.

Zwischenzustand

Detail nach Festigung, Reinigung und Verklebung des Gesichts.

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Figur der Maria
Thema:	Endzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	24,25,26	

Endzustand	**Endzustand**	**Endzustand**
Gesamtansicht Maria nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen	Gesamtansicht Maria nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen	Rückansicht Maria nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Korpus
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	27,28,29	

Vorzustand

Detail: Korpus nach dem Transport in die Restaurierungswerkstatt

Vorzustand

Detail: Die Zehen waren zu Beginn der Maßnahme bereits nicht mehr vorhanden.

Zwischenzustand

Detail: Risse wurden über Injektionen stabilisiert, Bruchstücke verklebt und mit Edelstahlstiften gesichert

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Korpus
Thema:	Vorzustand/ Zwischenzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	30,31	

Vorzustand Detail: Detail Arm mit Reinigungs-proben.	
Vorzustand Detail: Detail Arm nach Reinigung und Klebung	

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Korpus
Thema:	Zwischenzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	32,33	

Zwischenzustand *Detail: Korpus während der Rissinjektion*	
Zwischenzustand Korpus während der Egalisierung aufstehender Schuppen durch mineralische Schlämmen	

Objekt:	Kreuzigungsgruppe Ahlener Stadtpark	**Lokalisierung:** Korpus
Thema:	Endzustand	
Fotograf:	Fa. Lehmkuhl	
Bildnummer:	34	

Endzustand

Gesamtansicht des Korpus nach Abschluss der konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen

7.3.6 Verwendete Materialien

Tab. 68: *Materialliste verwendeter Restaurierungsmaterialien.*

Maßnahme	Material	Hersteller
Steinergänzungen	Mineros Steinergänzungsmörtel Antrag I und 2000	Fa. Krusemark, Baumit
Festigung stark aufgelockerter Mürbzonen	Acrylatdispersion Primal WS 24	Fa. Kremer Pigmente, Aichstetten
Fixierung von Gesteinsschalen	Lascaux Acrylkleber, 498 HV	Fa. Deffner & Johann
Mineralische Schlämme	Mineros 2000	Fa. Krusemark , Baumit
Klebungen	2-Komponenten-Epoxidharz Akepox 2000	Fa. Akemi
Retusche / Anstrich	Silikonharzlasur	Fa. Caparol

7.4 Fallbeispiel: Restaurierung an Werkstein - Musterfläche Werkstein Haus Stapel

(Robert Wennemer)

Im Rahmen des Forschungsprojektes zu Baumberger Kalksandstein wird eine Musterfläche nach dem im Projekt entwickelten Modulsystem ERKENNEN : HANDELN : PFLEGEN bearbeitet. Anhand der ausgeführten Modulpunkte und den dokumentierten beispielhaften Schritten der Restaurierungsmaßnahmen soll eine Vorlage für einen Leitfaden entstehen und Entscheidern ebenso wie Ausführenden eine Handlungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden. Die Musterfläche beruht auf dem aktuellen restauratorischen Kenntnisstand und ist auf die spezielle Objektsituation abgestimmt.

Für die Musterfläche in Werkstein wird ein Torpfeiler des nördlichen Tores der Vorburg auf Haus Stapel ausgewählt. Der Pfeiler zeigt für Baumberger Kalksandstein repräsentative Schadensbilder, die sich an vielen Werksteinflächen wiederfinden. Ziel ist die Konservierung und Restaurierung des Pfeilers. Neben der praktischen Umsetzung werden im Vorfeld Untersuchungen im MODUL : ERKENNEN durchgeführt: die Restaurierungsgeschichte wird eruiert, die Schadensphänomene sowie frühere Maßnahmen werden erfasst und lokalisiert. Zur Klärung und Einordnung von Schadensprozessen werden naturwissenschaftliche Untersuchungen vorgenommen. Sämtliche Maßnahmen und die ausführliche schriftliche und fotografische Dokumentation dienen zur Veranschaulichung und als Beispiel für weitere Objekte aus durch Althydrophobierung vorgeschädigte Baumberger Kalksandstein.

7.4.1 Objektidentifikation

Objektdaten	
Objekt	Haus Stapel, nördliches Tor, westlicher Pfeiler
Adresse	Gennerich 18, 48329 Havixbeck
Klara-ID	269295
Bauzeit	Vermutl. 1819-1827
Materialien	Baumberger Kalksandstein
Anlass/ Ziel der Maßnahme	Musterfläche Werksteinrestaurierung
Bearbeitungszeit	2022
Ausführender Restaurator	Robert Wennemer Restaurator M.A.

Abb. 130: *Vorburg, nördliches Tor, westlicher Pfeiler*

7.4.2 Objektbeschreibung

Das Haus Stapel befindet sich am Gennerich 18 in Havixbeck. Als Wasserburg wurde die Anlage bereits 1211 erwähnt. Die heutigen Gebäude, bestehend aus der Vorburg mit Torhaus und Wirtschaftsgebäuden sowie dem Herrenhaus, stammen aus verschiedenen Bauphasen. Das Torhaus mit Seitengebäuden wurde in der heutigen Form 1719 fertig gestellt. Das Herrenhaus wurde zwischen 1819-1827 erbaut.[74] Das nördliche Tor schließt den Raum zwischen Herrenhaus und Wirtschaftsgebäude. Dort befindet sich auch der bearbeitete Pfeiler. Der bearbeitete Pfeiler ist vermutlich im Zuge der Bauarbeiten am Herrenhaus entstanden.

[74] Georg Dehio Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler Nordrhein-Westfalen II Westfalen, Überarbeitete Ausgabe 2016, G. Dehio, et al., S. 414.

Der Pfeiler gliedert sich in eine leicht verbreiterte Basis, den Mittelteil und eine Pfeilerabdeckung. Während die Basis schlicht gearbeitet ist, ist der Mittelteil durch zurückspringende Zierfugen horizontal gegliedert. Hier sind die Steine ca. 5 cm x 5 cm ausgekastet. Die Fugen entsprechen auch den Werksteinhöhen. Stoßfugen sind schmal und bündig gehalten. So entsteht ein blockhafter Charakter. Die Pfeilerabdeckung ist weit auskragend und reich profiliert. Die Profile sind unterstochen gearbeitet. Die Pfeilerabdeckung besteht aus drei Steinlagen, die sich nach oben verjüngen. Der Pfeiler ist aus Baumberger Kalksandstein erstellt. Die Oberfläche der Quader ist scharriert und folgt einem Konzept: die Flächen sind vertikal scharriert, an den Pfeilerecken ist ein ca. 5cm breiter Streifen horizontal scharriert. Die Ausformung, Bearbeitung und Bauweise des Pfeilers entspricht dem des Herrenhauses und Torhauses. Setz- und Fugmörtel sind kalkgebunden. Die Quadersteine wurde in den horizontalen Fugen teilweise mit Eisenklammern verbunden. Die Klammern finden sich dort, wo früher das Tor befestigt gewesen war. Sie dienten vermutlich zur Aufnahme von Zugkräften durch das eiserne Torgitter. Farbfassungen sind nicht vorhanden.

Durch vorangegangene Restaurierungsmaßnahmen finden sich am Pfeiler Zementmörtel und Zementfugen. Fehlstellen wurden teilweise mit Ziegelsteinen ausgemauert. Die Oberfläche wurde bei einer früheren Maßnahme hydrophobiert.

7.4.3 Zustandsbeschreibung

Die Schäden an der Musterfläche am Pfeiler auf Haus Stapel sind im MODUL : ERKENNEN erfasst, beschrieben und kartiert (vgl. Kap. 6.10.2)
Es finden sich folgende Schäden:

- Frühere Maßnahmen (Steinergänzung-Vierung/Steinergänzung-Mörtel/Metall)
- Risse/Rissnetze
- Abmehlen/Absanden
- Abschuppen/Mürbzone (Aufblättern)
- Schalenbildung und abgängige Schalen (von > 0,3 cm, < 0,3 cm bis zu nicht definierter Dicke)
- Offene/defekte Fugen
- Materialverlust/Fehlstellen
- Oberflächenverschmutzung (Algen, Flechten/Moose/Verschwärzung/Salze)

7.5 Restaurierungskonzept Werkstein

Am Pfeiler auf Haus Stapel, der Musterfläche für Werkstein des Forschungsprojekts, werden konservatorische und restauratorische Maßnahmen durchgeführt. Zugrunde liegen die derzeitigen Erkenntnisse und Erfahrungen mit Baumberger Kalksandstein und hydrophobierten Flächen. Anhand der Schäden wird ein Maßnahmenkonzept erstellt. Dabei steht der Substanzerhalt und die Reduzierung von großflächigem Steinaustausch im Vordergrund.

Folgende Maßnahmen werden vorgenommen:

- Oberflächenreinigung
- Reduzierung schwarzer Krusten
- Abnahme loser Schalen und Schuppen
- Entfernung zementärer Mörtel
- Entfernung rostiger Dübel/ Klammern
- Strukturelle Festigung
- Ergänzungen mit Steinersatzmörtel (mit und ohne Armierung nach Bedarf)
- Rissinjektion
- Fixierung von Bruchstücken mit punktuellen Epoxidharz-Klebungen
- Vierungen aus Naturstein
- Quaderaustausch
- Fugenaustausch mit Kalkmörtel
- Auftrag einer Kalkschlämme

7.5.1 Oberflächenreinigung

Die Steinoberfläche wird mit Heißwasserhochruckreiniger bei geringem Druck vorsichtig von der biogenen Besiedlung und losen Verschmutzungen befreit. Die Temperastur wird auf 90°C eingestellt und der Druck auf ca. 20 bar reduziert. Bei der Reinigung wird darauf geachtet, die Steinoberfläche nicht abzutragen. Besonders hartnäckiger Bewuchs wird von Hand nachgereinigt.

Abb. 131: *Aufnahme nach der Reinigung. Die Schäden sind nun gut sichtbar.*

7.5.2 Reduzierung schwarzer Krusten

Die auf der Oberfläche in den regengeschützten Bereichen befindlichen schwarzen Krusten werden mittels Feinstrahltechnik ausgedünnt. Die Krusten werden dabei soweit wie möglich reduziert, ohne die Steinoberfläche zu beschädigen. Dafür wird der Luftdruck und die Strahlgutmenge zu Beginn eingestellt. Durch die Entfernung der Kruste werden die Spannungen an der Oberfläche reduziert und ein optisch ansprechenderes Bild erzeugt.

Abb. 132: *Vorher-Nachher Vergleich während der Entfernung der schwarzen Krusten. gelber Pfeil ungereinigt, blauer Pfeil gereinigt)*

Nach der Reinigung werden die losen Schalen und Schuppen abgenommen. Dabei wird die Oberfläche händisch mit Werkzeugen bearbeitet, ohne auffällige Bearbeitungsspuren zu hinterlassen. Fester sitzende Bereiche werden belassen.

Abb. 133: *Die losen Schuppen und Schalen wurden abgenommen.*

7.5.4 Entfernung zementhaltiger Mörtel

An dem Pfeiler werden die verschiedenen zementgebundenen Mörtel entfernt. Dabei handelt es sich um Fugenmörtel und Ergänzungsmassen. Die Mörtel sind alle von sehr hoher Festigkeit und optisch störend. Die Massen sind bereits desolat und haben teilweise zu Schäden im Untergrund oder den Randbereichen geführt.

Abb. 134: *Gereinigte Fläche mit Zementergänzungen.*

Abb. 135: *Blick hinter die Zementmörtel. Das Mauerwerk ist nass und stark geschädigt.*

Hinter den großflächigen Mörtelergänzungen am Sockel aus hochfestem Zementmörtel hat sich Staunässe gebildet und das hintere Mauerwerk im Pfeiler stark geschädigt.

7.5.5 Entfernung rostiger Dübel/Klammer

Im Pfeiler sind verschiedene rostige Dübel verbaut. Diese üben Druck auf das Steingefüge aus, in dessen Folge Fehlstellen und Risse im Naturstein entstehen. Die Klammern sind im Bereich des ehemaligen Torgitters verbaut und sollen vermutlich die Zugkräfte aufnehmen. Durch frühere Mörtelergänzungen ist ersichtlich, dass die Schäden schon länger vorliegen.
Lose Steinteile werden abgenommen, die Klammern freigearbeitet und entfernt. Dabei wird darauf geachtet, den Materialeingriff zur Entfernung der Metallklammern so gering wie möglich zu halten.

Abb. 136: *Rostige Dübel in den Fugen wurden entfernt.*

Abb. 137*: Nach Entfernung vorhandener Klammer.*

7.5.6 Strukturelle Festigung

Die entfestigten Bereiche am Naturstein werden partiell mit Kieselsäureester KSE 100 mit einer Gelabscheidungsrate von 10% gefestigt. Die Festigung erfolgt tiefgreifend auf die Schadstelle begrenzt. Die Applikation erfolgt in mehreren Durchgängen im Flutverfahren. Da der Stein den Festiger nur sehr langsam aufnimmt, muss der Behandlungszeitraum entsprechend lang sein. Nach der Festigung werden die Flächen mit der Verdünnung V101 nachgewaschen. Die Bereiche werden in den folgenden sechs Wochen nachversorgt und vor Feuchtigkeit und direkter Sonneneinstrahlung geschützt.

Abb. 138: *Die feuchten Bereiche im Bild zeigen die gefestigten Flächen auf.*

7.5.7 Ergänzung mit Steinersatzmörtel

Mörtelergänzungen werden in geschützten Bereichen vorgenommen. Diese werden mit einem Fertigmörtel, der in Körnung und Farbton dem Bestand angepasst wird, vorgenommen. Die Oberfläche wird dem Bestand angeglichen. Fehlstellen werden vorab auf eine Tiefe von mind. 1 cm und die Ränder mit steilen Kanten ausgearbeitet. Lose Teile werden entfernt. Die Bereiche werden von Staub befreit und gründlich vorgenässt. An relevanten Bereichen z.B. überhängenden Stellen, größeren Ergänzungen, absturzgefährdete Elementen werden Edelstahl-Armierungen vorgenommen. Sie bieten eine zusätzliche Halterung der Mörtelsubstanz bei größeren Mörtelmengen und durch Schwerkraft gefördertes Ablösen vor Abbindung der Masse. Die Klammern werden passgenau angefertigt und mit Epoxidharz eingeklebt. Auf eine genügende Mörtelüberdeckung ist zu geachtet. Die Dimensionierung der Klammern richtet sich nach den Erfordernissen des jeweiligen Bereichs.
Der Mörtel wird nass in nass mit einer Kontaktschlämme aufgetragen. Über Niveau aufgebracht kann er in einem weiteren Arbeitsschritt in Form gebracht und der umliegenden Oberflächenstruktur angepasst werden.

Abb. 139: *Armierung aus Edelstahl für die Haltung einer Mörtelergänzung.*

Abb. 140: *Auftragen einer Mörtelergänzung.*

7.5.8 Rissinjektion

Risse im Stein, werden mittels Injektionsmörtel verfüllt. Lose Steinstücke und absturzgefährdete Teile werden nicht verfüllt, sondern abgenommen und wo möglich punktuell verklebt. Die Injektion der Risse wird mit einem mineralischen Injektionsmörtel vorgenommen. Dazu werden die Risse über dosierten Einsatz von Luftdruck gesäubert und vorgenässt. Mittels Injektionsspritzen wird ein mineralischer Injektionsmörtel tiefgreifend und vollflächig in die Risse gefüllt. Die sichtbaren Risse werden abschließend mit einem Deckmörtel im Steinfarbton verschlossen.

Abb. 141: *Applikation des Rissinjektionsmörtel.*

7.5.9 Fixierung von Bruchstücken

Abb. 142*: Bruchstück wird angepasst und anschließend geklebt.*

Bruchstücke werden passgenau an den originalen Ort mit Epoxidharz geklebt. Die Klebefuge wird dünn ausgeführt. Die Bruchflächen werden vor dem Verkleben von Schmutz und losen Teilen befreit. Der Kleber wird punktuell aufgetragen, so kann er sich nach Andruck des Bruchstückes ausbreiten, eine dünne Klebefuge entstehen welche durch die Zwischenräume des aufgetragenen Klebers ein Wasseraustausch möglich.

7.5.10 Vierungen aus Naturstein

Große Fehlstellen im Stein und in besonders beanspruchten Bereichen werden mit Natursteinvierungen ergänzt. Diese Vierungen werden dem Bestand in Steinschichtung, Oberflächenbearbeitung und Dimensionierung genau angepasst. Die Schadstellen werden eckig ausgekastet. Dabei soll die Größe der Vierungen so gering wie möglich gehalten werden. Die Klebefuge soll dünn ausfallen und ist beim Zuarbeiten zu berücksichtigen. Die fertige Vierung wird an den zu verklebenden Seiten durch Steinmetzwerkzeuge aufgeraut, um eine Verzahnung mit dem umgebenden Mörtel zu ermöglichen. In die saubere Auskastung wird dann die Vierung mit einem mineralischen Kleber versetzt. Für eine kraftschlüssige Verbindung muss der Mörtel vollflächig anhaften. Die Fugen zwischen den Bauteilen werden dabei nicht verklebt sondern mit einem NHL Kalkmörtel verschlossen. Generell sind Steine und auch Vierungen horizontal im Lager einzubauen, Ausnahmen können z.B. lange oder besonders große Bauteile wie Gewände darstellen.

Abb. 143: *Vierungen aus Naturstein wurden nach Maß vorgefertigt und die Sägeflächen überarbeitet. So kann der Mörtel sich besser verkrallen.*

7.5.11 Steinaustausch

Bei starker Steinschädigung die vor allem auch statisch relevante Steinquader betrifft, werden diese ausgetauscht. Die stark geschädigten Steine werden für die umliegenden Steinflächen substanzschonend ausgebaut und ein neuer Stein entsprechend zugearbeitet. Steinschichtung, Oberflächenbearbeitung, Farbe und Dimensionierung werden dem Bestand angepasst. Generell sind Steine horizontal im Lager einzubauen, Ausnahmen können z.B. lange oder besonders große Bauteile wie Gewände darstellen. Die Steine sind so witterungsbeständiger. In den Fugenbereichen und an Mörtelkontaktflächen wird die Oberfläche des neuen Steins bearbeitet, um eine Verzahnung des Mörtels zu ermöglichen. Die neuen Quader werden mit einem NHL Kalk Mörtel/ Kalkmörtel mit hydraulischen Anteilen. versetzt. Hohlräume werden ebenfalls mit NHL Kalk Mörtel/ Kalkmörtel mit hydraulischen Anteilen verfüllt, so dass ein kraftschlüssiger und hohlraumfreier Verbund entsteht.

Abb. 144: *Verfüllung der Hohlräume hinter einem Quader mit einem Kalkmörtel.*

7.5.12 Fugenaustausch mit Kalkmörtel

Geschädigte Fugen und ungeeignete Zementfugen werden behutsam auf eine genügende Tiefe ausgearbeitet. Noch stabile Fugen sollen soweit wie möglich erhalten werden. In die mittels dosiertem Luftdruck gereinigten und mehrfach gründlich vorgenässten Fugen wird ein hydraulischer Fugenmörtel aus NHL Kalk oder Hydraulischem Kalk als Bindemittel eingebracht. Für Zuschläge sollten Quarzsande mit möglichst passender Farbigkeit gewählt werden. Der Mörtel ist über entsprechende Geräte in der Fuge zu komprimieren. Nach einer optisch zu beurteilenden, ausreichenden Wartezeit ist der Mörtel bei entsprechender Standfestigkeit oberflächlich aufzurauen und abzufegen. Das Fugenniveau ist hierbei so anzupassen, dass ein optimaler Ablauf von Spritzwasser und Niederschlägen gewähreistet ist. Eine gründliche Nachversorgung der Fugen durch Wässern ist in den Folgetagen für das optimale Abbinden des Mörtels unerlässlich, da das umgebende hydrophobe Steinmaterials kein ausreichendes Wasservorhaltevermögen hat.

7.5.13 Schlämmauftrag

Schuppige und aufgeraute Natursteinoberflächen werden mit einer Schlämme geschützt. Der Untergrund wird zunächst vorgenässt. Die Schlämme wird unter Nutzung von Pinseln in 2-3 Schichten nass in nass auf die betroffenen Flächen aufgetragen. Es werden unterschiedliche Farbtöne verwendet, um die zu schlämmende Fläche den verschiedenen Farbigkeiten des umliegenden Steinmaterials anzupassen. Eine gründliche Nachversorgung der Schlämme mit Wasser in den Folgetagen ist für das Abbinden des Mörtels unerlässlich. Als Mörtel wird ein NHL Kalkmörtel mit Quarzsanden als Zuschlag verwendet. Der Einsatz natürlicher Pigmente können für die farbliche Anpassung des Mörtels an das Steinmaterial genutzt werden. Die Dosierung der Pigmentzugabe ist genau abzuwägen, um die Bindung und somit die Standfestigkeit der Schlämme nicht negativ zu beeinflussen und einen beschleunigten Abbau hervorzurufen. Es sind weiche Restauriermörtel mit geeigneten Eigenschaften verwendbar, die auf das vorliegende Steinmaterial abgestimmt sind.

7.5.14 Verwendete Materialien

Tab. 69: *Materialste verwendeter Restaurierungsmaterialien.*

Maßnahme	Material	Hersteller
Oberflächenreinigung	Dampfreiniger	Kärcher Heißdampfreiniger HDS 6/14-4 CX Temperatur 60-90°C Geringer Druck
Reduzierung schwarzer Krusten	Partikelstrahlgut	IBIX Strahlgerät Strahlgut Granatsand Euro 5 Eurorubber Druck 1-2Bar
Festigung stark aufgelockerter Mürbzonen	Kieselsäureester KSE 100, Verdünnung V 101	Fa. Remmers
Steinergänzungen mit Mörtel	Mineros 0,3mm, Festigkeit I, Mineros 0,5mm, Festigkeit I, Licht- und kalkechte Pigmente	Fa. Krusemark, Baumit Fa. Kremer Pigmente
Rissinjektion	PLM-A Injektionsmörtel	Fa. Deffner& Johann
Klebungen	Epoxidharz Akepox 5010	Fa. Akemi
Steinvierungen	Baumberger Kalksandstein RYWA Natursteinkleber	Steinbruch Fark RYWA
Armierung	Edelstahlgewindestangen V4A div. Materialstärken Epoxidharz Akepox 5010	Fa. Akemi
Steinaustausch	Baumberger Kalksandstein	Steinbruch Fark
Neuverfugung		
Steinschlämme	Otterbeiner Kalk NHL 3,5, Licht- und kalkechte Pigmente Quarzsand gewaschen gelblich, div. Körnungen	Fa. Kalk-Zementwerke Otterbein Fa. Kremer Pigmente Quarzwerke Frechen

7.5.15 Maßnahmenkartierung

(Michael Peren, Wolfram Zalberg, LWL-DLBW, Robert Wennemer)

In der Maßnahmenkartierung sind die ausgeführten Arbeiten verzeichnet. Das beinhaltet die Untersuchungen ebenso wie die konservatorischen und restauratorischen Arbeiten.

7.5.15.1 Torpfeiler Nordansicht

7.5.15.2 Torpfeiler Südansicht

7.5.15.3 Torpfeiler Ostansicht

7.5.15.4 Torpfeiler Westansicht

7.5.16 Fotografische Zustandsdokumentation Restaurierung

Die Sortierung der Zustandsdokumentation erfolgt in der Abfolge der Ansichten.

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	**Lokalisierung:** Nordansicht
Thema:	Vorzustand/Endzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	22,23	

Vorzustand	Endzustand
Pfeiler vor der Restaurierung.	Pfeiler nach der Restaurierung.

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	**Lokalisierung:** Südansicht
Thema:	Vorzustand/Zwischenzustand/ Endzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	1,2,3	

Vorzustand	**Zwischenzustand**	**Endzustand**
Pfeiler vor der Restaurierung	Pfeiler während der Restaurierung. Ein Quader fehlt (gelber Pfeil), andere Quader sind schon eingebaut (blaue Pfeile).	Pfeiler nach der Restaurierung

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	***Lokalisierung:*** *Südansicht*
Thema:	Vorzustand/Zwischenzustand/	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	7, 8, 9, 10	

Vorzustand	
Pfeiler vor der Restaurierung.	
Zwischenzustand	
Pfeiler nach der Reinigung. Die offenen und defekten Fugen (gelber Pfeile) und großen Mörtelergänzungen (blaue Pfeile) sind nun gut sichtbar.	
Zwischenzustand	
Ein alter, loser Mauerstein wurde aus- und wieder eingebaut.	
Endzustand	
An der Pfeilerbasis sind neue Steine versetzt worden (blaue Pfeile). Ein alter Stein, der noch intakt war, wurde wieder eingebaut und nicht erneuert (grüner Pfeil).	

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	***Lokalisierung:*** *Südansicht*
Thema:	Zwischenzustand/ Endzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	11,12,13,14	

Zwischenzustand Ausgearbeitete Fehlstelle vor dem Ergänzen mit Mörtel. Vorzustand ersichtlich in Bildnummer 1.	
Zwischenzustand Bestreichen der Fehlstelle mit einer Kontaktschlämme.	
Zwischenzustand Nass in nass wird der Ergänzungsmörtel in die Schlämme aufgebracht.	
Zwischenzustand Die ergänzte Fehlstelle mit nachgearbeiteter angepasster Oberflächenstruktur.	

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	***Lokalisierung:*** Südansicht
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	15	

Vorzustand

Detail der schadhaften Quader vor der Restaurierung. Zu sehen sind eine große Fehlstelle (grüner Pfeil) mit alter Mörtelergänzungen (blauer Pfeil).

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	**Lokalisierung:** Südansicht
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	16	
Vorzustand		
Zustand während der Reinigung.		

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	**Lokalisierung**: Ostansicht
Thema:	Vorzustand/Zwischenzustand/ Endzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	17,18	

Vorzustand	Endzustand
Pfeiler vor der Restaurierung.	Pfeiler nach der Restaurierung.

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	*Lokalisierung:* Ostansicht
Thema:	Vorzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	19	
Vorzustand		
Detail schwarzer Krusten in den regengeschützten Bereichen vor der Restaurierung.		

Objekt:	Haus Stapel, Nördliches Tor, westlicher Pfeiler	***Lokalisierung:*** *Ostansicht*
Thema:	Zwischenzustand	
Fotograf:	Robert Wennemer M.A.	
Bildnummer:	20,21	

Zwischenzustand

Detail nach der Abnahme von losen Schuppen und Schalen.

Zwischenzustand

Detail der geschlämmten Fläche.

7.6 Modularer Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip

(Birte Graue, LWL-DLBW)

So wie das gesamte Projekt so ist auch die Bearbeitung im Umgang mit Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein gegliedert.
Sind die eingangs im MODUL : ERKENNEN erfassten Schadensphänomene, die Restaurierungsgeschichte mit verwendeten Materialien und die aktuellen Objektzustände bekannt, so kann darauf aufbauend im MODUL : HANDELN ein individuell angepasstes Maßnahmenkonzept erfolgen. Dieses soll durch den *Modularen Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip* unterstützt werden. Getrennt nach Restaurierung bildhauerisch bearbeiteter Objekte – wie Skulpturen, Bauplastik, Ornamentik, etc. – auf der einen Seite und der Restaurierung von Werksteinflächen – wie Fassaden, Mauern, Pfeiler, Wandvoralgen – auf der anderen Seite, stellt der jeweilige Katalog einen Maßnahmenkanon dar, aus dem Maßnahmen für das individuelle Konzept ausgewählt und sinnvoll im Baukasten-Prinzip zusammengesetzt werden können.

7.6.1 Auswahl von Restaurierungsmaterialien

Die Auswahl der Materialien zur Restaurierung wird maßgeblich von drei Faktoren bestimmt:

- Die Inhomogenität der hydrophoben/hydrophilen Eigenschaften der Oberflächen stellen eine Herausforderung bei Restaurierungsmaßnahmen dar, denn die Materialauswahl muss so getroffen werden, dass eine Haftung und Bindung zu beiden Oberflächen mit gegensätzlichen Eigenschaften möglich ist.
- Die Kompatibilität zu verwendeten Materialien früherer Maßnahmen muss gegeben sein, denn hier darf es zu keinen negativen Wechselwirkungen kommen und die neu eingebrachten Materialen müssen trotz Vorhandensein früher eingebachter Stoffe ihre erwünschte Wirkung erreichen.
- Eine Anwendung von Materialien in den verschiedenen Arbeitsschritten soll im Baukastensystem erfolgen, d.h. eine Grundrezeptur wird modifiziert bzw. die Variation der Materialrezeptur erfolgt auf Grundlage eines Bindemittels. Dadurch wird das Ineinandergreifen der auszuführenden Maßnahmen mit untereinander kompatiblen Materialien gewährleistet.
- Das Konzept sollte dem Baukastenprinzip folgen, das ein Ineinandergreifen der auszuführenden Maßnahmen mit untereinander kompatiblen Restaurierungsmaterialien – z.B. durch Materialmodifikationen für die verschiedenen, sich verschränkenden Maßnahmen als Variationen der Materialrezeptur auf Grundlage eines Bindemittels, so dass die einzelnen anzuwendenden Komponenten als Maßnahmenkette aufeinander aufbauen bzw. ineinandergreifen.

In der Regel haben sich Material-Bindemittelsysteme auf Basis von Kieselsäureester (KSE), mineralische Massen (Kalk, Kalk mit hydraulischen Zusätzen, natürlich hydraulischer Kalk (NHL) u.U. mit Zusatz von Kunstharz) und Massen auf Basis von Kieselsäuredispersion mit Zusatz von Kunstharz – abhängig von Objektgeschichte und –zustand bewährt.

7.6.2 Auswahl von Restaurierungsmethoden

Die Restaurierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein kann folgende Arbeitsschritte beinhalten:

Tab. 70: *Modularer Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip*

	Werksteinbereiche	Bauplastik und Skulptur
		• Vorfestigung
Reinigung	• Oberflächenreinigung • Reduzierung schwarzer Krusten	• Oberflächenreinigung • Reduzierung schwarzer Krusten • Salzreduzierung
Sicherungs-Maßnahmen	• Abnahme loser Schalen und Schuppen • Entfernung zementärer Mörtel • Entfernung rostiger Dübel/ Klammern	
Festigung	• Strukturelle Festigung	• Strukturelle Festigung
Stabilisierungs-Maßnahmen	• Rissinjektion • Punktuelle Klebung von Rissen und Schalen • Verdübelung von Rissen und Bruchstücken • Punktuelle Klebung von Bruchstücken mit Epoxidharz • Hohlraumverfüllung, Hinterfüllung von Schalen	• Verschlämmen von Schuppen. dünnen Schalen und schmalen Rissen • Klebung von Rissen und dünnen Schalen • Verdübelung von Rissen und Bruchstücken • Fixierung gelöster Steinelemente und dicker Schalen • Verfüllung von Rissen • Hohlraumverfüllung, Hinterfüllung von Schalen
Antragungen	• Ergänzungen mit Steinersatzmörtel von Fehlstellen im Naturstein	• Anböschung von kleineren Kanten • Antragung von Bruchkanten • Ergänzungen mit Steinersatzmörtel von Fehlstellen im Naturstein
Austausch-Maßnahmen	• Naturstein-Ergänzung von Fehlstellen im Naturstein (Vierung) • Steinaustausch kompletter Naturstein-Quader	
Fugenbearbeitung	• Fugenaustausch mit Kalkmörtel	• Fugenaustausch/ Fugenertüchtigung
Beschichtungs-system als Schutzfunktion	• Kalkschlämme • Silikonharzschlämme/-lasur	• Beschichtung als Schutzüberzug – z.B. Farbfassung als Schutzschicht • Beschichtung als Opferschicht – z.B. Schlämme als abschließender Überzug

Die Maßnahmen im Baukastenprinzip setzen sich aus der Kombination von Materialien und Methoden der Arbeitsschritte zur Restaurierung zusammen, wobei das Beibehalten eines Bindemittelsystems zielführend ist.

8. MODUL : PFLEGEN

8.1 Restaurierung erfordert Nachhaltigkeit

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Oft genug wird eine Erhaltungsmaßnahme am Denkmal abgeschlossen, ohne dass die weitere Pflege durch Monitoring überwacht und begleitet wird. Durch diese Unterlassungen entstehen Schäden und Kosten. Das regelhafte Beobachten und Kontrollieren – Monitoring – sowie die regelmäßige Wartung der Denkmäler im Sinne eines vorbeugenden Denkmalschutzes lassen Gefahren frühzeitig erkennen und größere Schäden gar nicht erst entstehen. So unterstützt der präventive Schutz durch Monitoring, Pflege und Wartung den langfristigen Erhalt unserer Denkmäler.
Ein zunehmender Veränderungsdruck auf unsere Denkmäler ist festzustellen: durch Klimaveränderungen, durch Nutzungsänderungen und durch grundsätzlich schwindende finanzielle Ressourcen für den Erhalt von Denkmälern. Es ist zu beobachten, dass die Veränderungen vielschichtiger, komplexer und schneller werden.
Um langfristige Erhaltungsstrategien für Denkmäler entwickeln zu können, ist Monitoring ein grundlegendes Instrument.
Monitoring als Instrument der präventiven Konservierung beobachtet und erfasst:

- Veränderungen der Rahmenbedingungen, der äußeren Umstände, des Wandels an sich,
- Veränderung am oder/und im jeweiligen Objekt oder einer Mehrzahl von Objekten,

um darauf aufbauend für die Zukunft zielgerichtete, präventive Handlungsoptionen zum Schutz des Denkmals zu entwickeln.

Vor dem Hintergrund weiterhin stark abnehmender finanzieller Ressourcen für Denkmalschutz und Denkmalpflege – aufgrund geopolitischer Krisen, Klimawandel und Klimaschutz, Katastrophenfällen und Notfallsituationen, aber auch aufgrund schwindender Finanzen bei Kirchen durch massive Kirchenaustritte sowie steigender Finanzbedarfe der öffentlichen Hand durch den Sanierungsstau in den östlichen Bundesländern – sind Konzepte zum Geldsparen und eine höhere Effizienz von Maßnahmen gefragt. Hier werden verlässliche Planungs- und Kontrollinstrumente benötigt, die bei geringerem Aufwand dennoch den langfristigen Erhalt der Denkmäler gewährleisten können. Durch regelmäßiges Monitoring der Denkmäler können größere Schäden und damit umfangreiche und teure Maßnahmen vermieden werden. Kluge Monitoring-, Pflege- und Wartungskonzepte sind nachhaltige und zukunftsweisende Instrumente.
Nicht destotrotz ist immer noch die Feststellung der im Bereich Denkmalpflege Tätigen, dass diese Instrumente viel zu selten eingesetzt werden. (GRAUE in Druck)

Mit Blick auf die Objekte aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein wird allein aufgrund der Betrachtung der vielen, sich wiederholenden Restaurierungsmaßnahmen in zeitlich relativ kurzen Abständen deutlich, dass an den Objekten – auch den restaurierten – immer wieder Veränderungen und Schäden auftreten. Ein Monitoring kann hier gewährleisten, dass die Veränderungen zeitnah festgestellt werden, bevor sie zu Schäden führen. So kann mit Maßnahmen in relativ kleinem Umfang einer Schädigung vorgegriffen werden. Bestenfalls entstehen also durch das regelhafte Monitoring keine Schäden am Objekt.

8.2 Monitoring: Ziele, Standards und Methoden

(Birte Graue, LWL-DLBW)

„Monitoring umfasst die Beobachtung, Erfassung und Überwachung eines Prozesses und die Ableitung notwendiger Maßnahmen. Auf die Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege übertragen bedeutet es die Betrachtung und Bewertung von Veränderungen in Hinblick auf Verwitterungsprozesse und die Effektivität von Erhaltungsmaßnahmen." (WTA 3-18-14/D, S.4) Es kann dabei die Lebensdauer von Objekten verlängern und zur Verkehrssicherheit sowie zur Vermeidung von teuren und umfassenden Instandsetzungsmaßnahmen beitragen.

Monitoring: Zielstellungen

Die Zielstellung von Monitoring sind die Zustandserfassung zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Feststellung von Veränderung – entweder Veränderung am Objekt oder den Umgebungsbedingungen (z.B. Klima-Monitoring). Dabei wird festgestellt, ab wann die Veränderung (d.h. Veränderung des Objektzustands oder der klimatischen Verhältnisse) zu einem Schaden führen kann oder auch bereits geführt hat. Durch das regelmäßige Beobachten werden Veränderungen rechtzeitig festgestellt, bevor sie zu Schäden führen oder kleinere Schäden werden frühzeitig entdeckt und erkannt und können mit Maßnahmen kleineren Umfangs behoben werden, bevor es zu größeren oder gar Folgeschäden kommt.

In Bezug auf Objekte aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein sollen Monitoring-Programme erstellt werden, die die am Objekt erfolgten, spezifischen Maßnahmen langfristig beobachten und kontrollieren, damit Veränderungen frühzeitig detektiert und ein Eingreifen ermöglicht werden können, bevor die Veränderung zum Schaden wird.

Monitoring: Standards

Die Zielstellung des Monitorings gibt die eizusetzenden Methoden vor, dies soll anhand der Fallbeispiele erläutert werden. Grundsätzlich gilt, dass Zustandsveränderungen beobachtet und gemessen werden, um die Folgen der Veränderung festzustellen und Erhaltungsmaßnahmen vornehmen zu können.
Die Wartung als Erhaltungsmaßnahme ist seit vielen Jahrhunderten bekannt und war früher stärker geübte Praxis. Es kann spekuliert werden, ob sie mit der Vorstellung, Baumaterialien „für die Ewigkeit" geschaffen zu haben, im letzten Jahrhundert stark zurückgegangen ist. Diese Leerstelle ist in den letzten Jahren erkannt worden und es gibt mittlerweile verschiedene Gremien und Publikationen zum Themenbereich (s. weiterführende Literatur).

Monitoring: Methoden

Da bei Objekten aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein die am Objekt erfolgten, spezifischen Maßnahmen beobachtet und kontrolliert werden, müssen zum einen die Parameter der Veränderung bis hin zum Schaden festgelegt und zum anderen Methoden ausgewählt werden, die die jeweils mögliche Veränderung der Maßnahme detektieren können.
Grundsätzlich für sämtliche Detektionen gilt, dass sie mittels optischer Überprüfung, fotografischer Erfassung und Kartierung z.T. erfolgen, aber unbedingt dokumentiert werden. In der folgenden Aufzählung und Tabelle werden sämtlich mögliche Methoden aufgeführt.

8.2.1 Monitoring Methoden

Optische Überprüfung

Zweck: Feststellen makroskopisch (mikroskopisch) sichtbarer Veränderungen und Schäden (wie z.B. Oberflächenveränderungen, Flankenanhaftung, schadhafte Anschlüsse von Antragungen, Anböschungen, Ergänzungen; Haarrisse; schadhafte Fugen)

Verfahren: Betrachtung
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Lokalisierung (Kartierung) und Bemaßung und Quantifizierung der Schäden. Bei der optischen Zustandsuntersuchung sollen Größenordnung quantifiziert (z.B. mittels Bemaßung) werden.

Fotografische Erfassung

Zweck: Dokumentation und Abgleich

Verfahren: fotografisch
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Fotoglossar, Lokalisierung anhand der Kartierung, Bemaßung der Darstellung sowie Angabe der Kamera-Einstellungen

Kartierung

Zweck: Dokumentation und Abgleich

Verfahren: Lokalisierung und grafische Darstellung der von Art und Umfang der vorhandenen Schäden und der verschiedenen Untersuchungen auf zuvor festgelegten und immer wieder zu verwendenden Kartierungsgrundlagen (Schadensglossar, Kartierungslegende, Plan, Orthophoto, 3D-Scan)
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Kartografische Dokumentation

Farbwertmessung mittels VIS-Spektroskopie

Zweck: Farbwertermittlung insbesondere in Hinblick auf Oberflächenveränderungen

Verfahren: Beleuchtung der Oberfläche mithilfe eines Spektralphotometers
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Wiedergabe der Reflexionskurve als Koordinaten im standardisierten L*a*b*-Farbraum (ARNOLD & MEINHARDT, 2011, S. 110f)

Grauwertmessung mittels Grauwertkarte

Zweck: Grauwertermittlung insbesondere in Hinblick auf Oberflächenveränderungen

Verfahren: Abgleich des Oberflächen-Grauwertes mit standardisierter Grauwertkarte (u.U. Makroaufnahme)
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Wiedergabe der Grauwerte anhand der standardisierten Grauskala (ARNOLD & MEINHARDT, 2011, S. 110f)

Tab. 71: *Maßnahmen- und Schadensspezifische Zuordnung von Monitoring-Methoden.*

Vorangegangene Maßnahme	Schadhafte Veränderung	Bewertungskriterium	Mögliche Monitoring-Methoden *
Oberflächenreinigung	Schmutzkruste	Oberflächenveränderung	Farb- und/oder Grauwertmessung
Entfernen biologischen Befalls	Stärkere biologische Besiedlung	Oberflächenveränderung	Farbwertmessung, Mikrobiologisches Monitoring
Salzminderung	Salzausblühungen, strukturelle Schäden (Absanden, Abschuppen)	Salze	Untersuchung bauschädlicher Salze
Strukturelle Festigung	Absanden, Abschuppen	Materialverlust	Abrieb-Test, Messen der Ultraschall-Laufzeit, Bohrwiderstandsmessung
Rissinjektion	Rissöffnung, Flankenabriss	Risse	Rissmonitor (analog oder digital) (AURAS 2011a, S. 114ff)
Schalenhinterfüllung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Schale	Adhäsions-/ Kohäsions-Verlust, Materialverlust	Abrieb-Test, Hohlstellen-Detektion mittels Resonanzfühler, Messen der Ultraschall-Laufzeit, Bohrwiderstandsmessung
Anböschung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Anböschung	Adhäsions-/ Kohäsions-Verlust, Materialverlust	Abrieb-Test, Hohlstellen-Detektion mittels Resonanzfühler
Klebung	Adhäsionsverlust, Ablösen	Adhäsionsverlust	Hohlstellen-Detektion mittels Resonanzfühler, Messen der Ultraschall-Laufzeit, Bohrwiderstandsmessung
Vernadelung	Adhäsionsverlust, Ablösen, Korrosion	Adhäsionsverlust	Hohlstellen-Detektion mittels Resonanzfühler, Messen der Ultraschall-Laufzeit, Bohrwiderstandsmessung
Mörtelergänzung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Ergänzung	Adhäsions-/ Kohäsions-Verlust, Materialverlust	Abrieb-Test, Hohlstellen-Detektion mittels Resonanzfühler, Messen der Ultraschall-Laufzeit, Bohrwiderstandsmessung
Vierung	Flankenabriss bis Öffnung der Fuge	Risse, Materialverlust	Rissmonitor (analog oder digital)
Steinaustausch	Unverträglichkeit, Flankenabriss bis Öffnung der Fuge, Bildung bauschädlicher Salze	Risse, Salze, Farbveränderung, Materialverlust	Rissmonitor, Untersuchung bauschädlicher Salze, Farbwertmessung, Abrieb-Test
Neuverfugung	Flankenabriss bis Öffnung der Fuge, Verlust des Fugenmörtels	Risse, Materialverlust	
Beschichtung mit Kalkschlämme	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Beschichtung	Materialverlust	Abrieb-Test, Bestimmung der Wasseraufnahme nach Karsten

Silikonharzbeschichtung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Beschichtung	Materialverlust	Abrieb-Test, Bestimmung der Wasseraufnahme nach Karsten, Bestimmung des Schälwiderstands
Silikatische Beschichtung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Beschichtung	Materialverlust	Abrieb-Test, Bestimmung der Wasseraufnahme nach Karsten, Bestimmung des Schälwiderstands

* grundsätzlich anzuwendende Methoden sind: optische Überprüfung, fotografische Erfassung und Kartierung (Quantifizierung über Kartierung)

Abriebtest

Zweck: Überprüfung der Kohäsion einer Oberfläche und auch der Adhäsion einer Beschichtung

Verfahren: In einer definierten und durch eine Schablone klar begrenzten Fläche (z.B. 10 x 10 cm) wird die Oberfläche mittels eines harten Borsten-Pinsels (sog. Freilege-Pinsel) abgebürstet und die Menge des Abriebs gravimetrisch bestimmt. Die Fläche sollte 10-Mal vertikal und 10-Mal horizontal gebürstet werden. Das aufgefangene Material (z.B. in einer Pulverschaufel) wird bei 60°C getrocknet und anschließend gewogen.
Das Verfahren ist zerstörungsarm.

Dokumentation der Ergebnisse: Lokalisierung (Kartierung) und Angabe der Menge des Abriebmaterials in Gramm [g] relativ zur Prüffläche (100 cm^2) [cm^2]

(KIRCHNER & ZALLMANZIG 2022a, S. 54ff)

Bestimmung des Schälwiderstands

Zweck: Überprüfung der Kohäsion einer Oberfläche und auch der Adhäsion einer Beschichtung

Verfahren: Auf die leicht abgeblasene Oberfläche wird ein Klebeband definierter Größe aufgebracht und mittels einer Federwaage (mit mitlaufendem Zeiger) abgezogen.
Das Verfahren ist zerstörungsarm.

Dokumentation der Ergebnisse: Ermittlung des Schälwiderstands *w* als Quotient aus der Kraft *F*, die notwendig ist, die Klebefläche *A* (Länge x Breite des Klebestreifens) von der Oberfläche zu ziehen. Aufgrund es am Klebestreifen anhaftenden Materials kann auf die Güte der Kohäsion rückgeschlossen werden.

(KIRCHNER & ZALLMANZIG 2022b, S. 58ff)

Hohlstellendetektion mittels Resonanzfühler/Perkussions-Untersuchung

Zweck: Ermittlung von Hohlstellen in Gefügebereiche und/oder Materialgrenzflächen

Verfahren: Der Resonanzklangfühler (Edelstahlkugel mit Ø=20mm an einem ausziehbaren Stab) wird leicht mit der Hand über die Oberfläche geführt. Die Resonanz der Hohlstellen wird akustisch wahrnehmbar.
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Lokalisierung wechselnder Resonanzen (Kartierung), u.U. zusätzlich Beschreibung des akustischen Eindrucks (hohl, „scheppernd“)

(SNETHLAGE 2011, S. 99f)

Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten oder Mirowski

Zweck: Feststellen der kapillaren Wasseraufnahme in untersuchten Bereichen, um die Wirkung von Maßnahmen oder Objektzustände bewerten zu können.

Verfahren: Aufsetzen des Prüfröhrchens auf die Messoberfläche, Befüllen des skalierten Zuleitungsröhrchens mit entmineralisiertem Wasser, Festhalten des Absinkens des Füllstandes am skalierten Zuleitungsröhrchen bei gleichzeitigem Messen der Zeit während des Eindringens des Wassers
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Mittels computergestütztem Auswertungsprogramm können Wassereindringkoeffizient (B-Wert), Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) und die Wasseraufnahmekapazität (WAK) ermittelt werden.

(D'HAM et al. 2011, S. 82ff; KOZUB 2020)

Messen der Ultraschall-Laufzeit

Zweck: Da die Ultraschallgeschwindigkeit positiv mit der Dichte bzw. der Festigkeit des Materials zu korrelieren ist, kann bei höheren Werten der Ultraschall-Laufzeiten auf größere Festigkeiten bzw. höhere Dichten des bemessenen Materials rückgeschlossen werden. Bei Hohlstellen in Gefügebereiche und/oder Materialgrenzflächen findet eine auffällige Verzögerung der Signalübertragung und damit eine Verlängerung der Ultraschall-Laufzeit statt.

Verfahren: Von einem ersten Wandler (Sender) wird im Kontakt zur Messoberfläche ein Ultraschallimpuls ausgesendet, der unterschiedliche Arten von Ultraschallwellen erzeugt. Nach Durchlaufen des Materials werden diese Ultraschallwellen von einem zweiten Wandler (Empfänger) aufgenommen.
Das Verfahren ist zerstörungsfrei.

Dokumentation der Ergebnisse: Die Ultraschallgeschwindigkeit wird im Verhältnis der Strecke (mm) zur Laufzeit (µs) auf 0,01 km/s genau angegeben.

(AURAS 2011b, S. 47ff)

Bohrwiderstand-Prüfverfahren

Zweck: Der Bohrwiderstand bzw. die Bohrhärte wird positiv korreliert zur Festigkeit des untersuchten Materials. Anhand der Ermittlung von Festigkeitsprofilen können Rückschlüsse auf räumlich zuzuordnende Materialzustände und mögliche Schäden geschlossen werden. Dabei sind vor allem vergleichende Bohrhärteuntersuchungen - an verschiedenen Beprobungsstellen – möglich.

Verfahren: Das entsprechende Bohrgerät wird mit konstanter Kraft an die Oberfläche der Beprobungsstelle gedrückt gehalten. Entweder wird über Messung der gesteinstiefen Eindringgeschwindigkeit als Funktion der Zeit oder mittels eines Bohrkraft-Mess-System (DFMS) der Bohrwiderstand ermittelt.
Das Verfahren ist zerstörungsarm.

Dokumentation der Ergebnisse: Das Bohrwiderstandsprofil als grafischer Kurvenverlauf zeigt den Bohrwiderstand cot a [s/mm] gegen die Bohrtiefe [mm]. Bei Messung über ein Bohrkraft-Mess-System (DFMS) wird der Bohrwiderstand als funktioneller Zusammenhang zwischen den Variablen Kraft und Bohrtiefe ermittelt.

(MEINHARDT & PFEFFERKORN 2011, S. 65ff)

Untersuchung bauschädlicher Salze

Zweck: Quantitative/semiquantitative Salzanalysen können gezielte Erhaltungsmaßnahmen an betroffenen Objekten unterstützen. Kristallisation- aber vor allem Hydratationsbedingte Volumenveränderungen von Salzen führen i.d,R. aufgrund von Druckentwicklung zu irreversiblen Schädigungen des Gefüges bzw. zu Absprengungen im oberflächennahen Bereichen und damit unwiederbringlicher Zerstörung.

Verfahren: Über Leitfähigkeitsmessungen wässriger Eluate oder mittels Teststäbchen können kostengünstig Salzbelastungen semiquantitativ ermittelt werden. Qualitative Aussagen zu Salzen lassen sich an geringen Probenmengen der entnommenen Salze anhand mikrochemischer Nachweismethoden, Polarisationsmikroskopie, Rasterelektronen-mikroskopie mit angeschlossener energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse oder Röntgendiffraktometrie treffen. Quantitative Analysen mit Ermittlung von Anionen und Kationen werden beispielsweise mittels Ionenchromatographie, Atomabsorptions-analyse oder Atomemissionsanalyse durchgeführt.
Das Verfahren ist zerstörungsfrei bis zerstörungsarm.

Dokumentation der Ergebnisse: Auskunft über Mineralphasen und/oder quantitative Gehalte bauschädlicher Salze.
(AURAS 2011c, S. 104f)

Mikrobiologisches Monitoring (MBM)

Zweck: Mikrobieller Befall kann zu chemischen sowie physikalischen Schadensprozessen und damit nachhaltig zur Substanzschädigung führen. Das MBM unterstützt die Klassifizierung des mikrobiellen Befalls als auch die Detektion potentieller Zustandsveränderungen aufgrund mikrobiell bedingte Schädigung.

Verfahren: Das MBM ist ein komplementäres Untersuchungsverfahren, das Farbmessungen, Ermittlungen der kapillaren Wasseraufnahme, Bohrwiderstand-Prüfverfahren, Schälwiderstands-Messungen, ATP-Bestimmungen, Keimzählungen, Biomassebestimmungen, taxonomische Bestimmungen, mikroskopische sowie biochemische und molekularbiologische Verfahren einbeziehen kann.
Die Verfahren sind zerstörungsfrei bis zerstörungsarm.

Dokumentation der Ergebnisse: Die Auswertung der erhobenen Daten soll den mikrobiellen Einflusses klassifizieren in: nicht schädlich, mittelfristig schädlich, unmittelbar schädlich.
(WARSCHEID, 2011, S. 106f)

Da ein Monitoring alle drei bis fünf Jahre in denselben Bereichen und mit derselben Methodik wiederholt werden soll, ist die Beschreibung der tatsächlich jeweils angewandten Methode grundlegend entscheidend für die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Untersuchungen und die Belastbarkeit der getroffenen Bewertunngen.

8.3 Fallbeispiele

Im Folgenden sollen Bausteine für objektspezifische Monitoring-Programme anhand von Fallbeispielen einzelner Monitoring-Methoden und bestimmter Objekte vorgestellt werden.

8.3.1 Erfassung mikrotopographischer Veränderungen der Steinoberfläche über einen Vergleich zwei virtueller 3D-Zustandsmodelle

(Peter Kozub; CICS Köln)

8.3.1.1 Einführung

Bislang erfolgte die Quantifizierung von Materialveränderungen visuell durch eine subjektive Beurteilung des Vorher-Nachher-Zustands durch geschulte Restauratorinnen und Restauratoren. Zu diesem Zweck verwendeten sie in der Regel digitale Fotos zusammen mit manuellen oder computergestützten Kartierungen. Materialveränderungen im mikroskopischen Bereich, die sich im

Laufe der Zeit zu sichtbaren Schäden aufsummieren können, sind bei dieser Methode jedoch systematisch unentdeckt geblieben.
Mit einer speziellen Software können digitalisierte Objekte virtuell miteinander verglichen werden. Es ist ebenfalls möglich, Formveränderungen durch den Vergleich von 3D-Modellen ein und desselben Objekts zu erkennen Hierfür werden in beiden Fällen Datensätze von Oberflächenscans der beiden Vergleichsobjekte übereinandergelegt, und die Software berechnet die jeweiligen Differenzen und zeigt sie in einer farbcodierten Darstellung des Modells an.
Die 3D-Scans können daher sowohl zur präzisen Dokumentation des Ist-Zustandes als auch, wenn die Scans von zwei nahezu identischen Objekten oder einem Objekt zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, zur digitalen Darstellung sehr kleiner Formunterschiede bzw. Formveränderungen verwendet werden.
Im Projekt „Umgang mit Althydrophobierungen - Modellhafte Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein sowie Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens" werden die Auswirkungen von Verwitterungsprozessen an einem hydrophobierten Baumberger Kalksandsteinobjekt durch den Vergleich von hochaufgelöster 3D-Bildern, die zu zwei Zeitpunkten während der Freibewitterung aufgenommen wurden, visualisiert.

8.3.1.2 Methodik

In dem vorgestellten Beispiel wurden Scans der Steinquaderoberfläche in zwei verschiedenen Verwitterungsphasen miteinander verglichen.
Bei der untersuchten Fläche handelt es sich um die nach Süden ausgerichtete, etwa 4.5oo cm² große Oberfläche eines Steinquaders in der Südwestecke des nördlichen Außenflügels der Vorburg Haus Stapel in Havixbeck (Objektcode: HS-b). Die Fläche befindet sich etwa 70 cm über dem Boden. Am Boden ist eine vertikale Barriere gegen aufsteigende Bodenfeuchtigkeit sichtbar (siehe **Abb.145**)

Abb. 145: *Südostecke des nördlichen Außenflügels der Vorburg Haus Stapel in Havixbeck. Der dunkelrote Rand markiert den gescannten Bereich.*

Der Baumberger Kalksandsteinquader wurde laut Recherche 1985/86 hydrophobiert. Die Oberfläche des Steinblocks ist derzeit in einem sehr schlechten Zustand. Es sind Schalen als auch absandende und abschuppende Bereiche vorhanden. Die Kanten und Ecken des Quaders sind stark abgerundet.
Der erste Scan wurde am 03.05.2019 durchgeführt. Das 3D-Modell der Fläche besteht aus 5.231.584 Polygonen. Der zweite Scan erfolgte am 09.07.2021, also nach etwa zwei Jahren freier Bewitterung. Dieses 3D-Modell besteht aus 5.212.606 Polygonen. Beide Scans wurden mit dem Artec Spider Space Handscanner der Firma Artec3D erstellt. Dieser Scanner ermöglicht eine 3D-Punktgenauigkeit bis zu 0,05 mm (ARTEC D3 2018).
Zur Erstellung der 3D-Modelle, zur Berechnung der Differenzen zwischen den beiden Modellen, Generierung der farbcodierten Darstellung der Abweichungen und Anfertigung der Schnittprofile wurde die Software Artec Studio 15 von Artec3D verwendet. Die Veränderungen werden als Falschfarben wiedergegeben, an denen das Ausmaß der Veränderungen mit Submillimetergenauigkeit abgelesen werden kann.

8.3.1.3 Auswertung der Ergebnisse

In Abbildung **Abb. 146** und **Abb. 147** wurde die Skalierung so gewählt, dass Abweichungen von maximal -5 bis +5 Millimetern dargestellt werden. Allerdings nicht alle Unterschiede zwischen den beiden Scans liegen in diesem Intervall. Einige rot hervorgehobene Bereiche weisen noch größere Unterschiede auf, die bei dieser Skalierung nur durch Stichprobenmessungen zu erkennen sind (s.u.).
Bereiche, in denen der Unterschied weniger als 0,02 mm beträgt, d. h. auch außerhalb der Scan-Genauigkeit, sind grün hervorgehoben. Die gelb-orange-rote Färbung deutet auf eine Volumenverringerung hin. Eine Färbung in Richtung Blau bedeutet eine Zunahme des Volumens.

Abb. 146: *Falschfarbendarstellung der Unterschiede der untersuchten Oberfläche nach zwei Jahren freier Bewitterung im Intervall von -5 bis +5 Millimetern. Orthogonale Projektion.*

Der größte Verlust an Steinmaterial ist am Rand der Schale in der linken Hälfte des betrachteten Feldes zu verzeichnen (siehe dunkelrote Umrandung). Insbesondere am oberen Rand der Schale ist ein Schichtverlust von mehr als 8,5 mm detektiert worden (Stichprobenmessung). In diesem Fall handelt es sich um den verlorenen Rand der Schale. Hier ist ebenfalls zu sehen ein kleiner dunkelblau markierter Bereich, wo ein Fragment einer abgefallenen Schale liegengeblieben ist.

Abb. 147: *Zwei Flächen des Steinquaders (links Westseite, recht Südseite) mit Falschfarbendarstellung der Unterschiede im perspektivische Darstellung.*

Im unteren Teil der Schale, direkt über der rot markierten Fehlstelle, ist eine hellblaue Färbung zu sehen. Auch die Fragmente der Sekundärschale darunter und die ebenso sekundär entstandenen Schale im oberen rechten Teil der Fläche zeigen diese Färbung. Dies zeigt eine Wölbung dieser Bereiche von bis zu 0,1 mm an.
In einigen Bereichen, vor allem auf der rechten Seite des Feldes, gibt es vereinzelte gelb-orange Färbungen. Diese Bereiche sanden stark ab. Der hier ermittelte Verlust beträgt etwa 0,3 mm.
Überraschenderweise ist in dem stark ausgeprägten Riss etwa in der Mitte der rechten Hälfte der Fläche kein neuer Schaden zu erkennen.

Besonders auffällig ist, dass die südliche Seite des Steinquaders starke Schäden zeigt, während die westliche Seite fast keinen Schaden aufweist (siehe **Abb. 147**).
Die Ansicht der Schnittlinienauswahl (**Abb. 148**) bestätigt ebenfalls die Ergebnisse der Falschfarbendarstellung. Die Abweichung der Oberflächenlinie im oberen Teil des Schnittes (siehe dunkelrote Umrandung) zeigt deutlich den Bereich des größten Verlustes in der untersuchten Fläche an. Dieser Schalenverlust ist auch in **Abb. 146** und **Abb. 147** zu sehen. Die Krümmung der Schale im unteren Bereich (von ungefähr 0,1 mm) ist hier dagegen nicht erkennbar. Dieses Phänomen ist aber deutlich auf der Abbildungen **Abb. 146** und **Abb. 147** deutlich zu sehen.

8.3.1.4 Fazit

Durch die Erfassung von mikrotopographischen Veränderungen der Steinoberfläche durch den teilautomatisierten Vergleich von virtuellen 3D-Zustandsmodellen werden mögliche Veränderungen, hervorgerufen z.B. durch Verwitterungsprozesse, deutlich erfasst. Durch die Erstellung eines 3D-Veränderungsprotokolls kann die Klassifizierung von Schäden hinsichtlich ihres Veränderungspotenzials deutlich verbessert werden. Die Ergebnisse der auf diese Weise durchgeführten Kontrolle können zu einer genaueren Schadensanalyse beitragen, die wiederum zu gezielten Restaurierungsmaßnahmen an Steinobjekten führen kann.

Die großen Vorteile dieser Methode sind zum einen die hohe Genauigkeit im Submillimeterbereich und zum anderen die berührungslose Arbeitsweise. Die Kontrollmessungen können in beliebigen Zeitintervallen durchgeführt werden.
Die generierten Daten bieten viele Vorteile. Die Tatsache, dass die Geometriedaten ohne Texturierung vorliegen, ermöglicht die Visualisierung von Formveränderungen, die aufgrund der Mehrfarbigkeit von Verwitterungsprodukte mit dem bloßen Auge kaum noch wahrnehmbar sind. Mit anderen Methoden wäre es beinahe unmöglich, diese Veränderungen auf der Oberfläche zu erfassen, insbesondere die Verluste auf der rechten Seite des Quaders, die durch das Absanden entstanden sind, oder die Wölbung der Schalenoberfläche.
Auch eine quantitative Bewertung der materiellen Verluste wäre praktisch unmöglich. Wenn die verlorenen Teile nicht auf irgendeine Weise gesammelt werden, werden diese Informationen mit Sicherheit verloren gehen.
Vielfältige Darstellungsmöglichkeiten der Ergebnisse, wie unterschiedliche Skalierung, Wahl des Betrachtungswinkels und der Beleuchtung, Darstellung mit und ohne Texturierung oder Auswertung von Querschnittsprofilen, helfen bei der Analyse der eingetretenen Veränderungen und erleichtern die Interpretation, die wesentlich klarer und verständlicher sein kann.
Die vorgestellten Untersuchungen bestätigen, dass die Oberflächenregistrierung mit einem 3D-Scanner eine hervorragende Methode zur Erfassung und Analyse von Veränderungen der Oberflächenform von Steinobjekten ist. Vor allem die hohe Auflösung im Submillimeterbereich in Verbindung mit dem berührungslosen Verfahren prädestiniert diese Technik für den Einsatz in der Denkmalpflege und Restaurierungswissenschaft.

Abb. 148: *Schnittlinienselektionsansicht A-A durch das 3D- Modell des Scans vom 03.05.2019 (grüne Linie) und das 3D- Modell des Scans vom 09.07.2021 (rote Linie). An der Stelle des neu entstandenen Schadens ist ein deutlicher Unterschied im Linienverlauf des Nachzustandsmodells im Vergleich zum Vorzustandsmodell zu erkennen (dunkelrote Umrandung).*

8.3.2 Prozessentwicklung eines UAV-gestützten Monitoring-Verfahrens für ornamentale Steinobjekte mittels 3D-Oberflächenabgleich

(Christoffer Diedrich, unter Mitarbeit von Carsten Haubrock, Sabine Niggemann, Michael Peren und Marc Ziegert, LWL-DLBW)

8.3.2.1 Einführung

Im Rahmen des Projektes „Umgang mit Althydrophobierungen - Modellhafte Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein sowie Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens" wird die Fragestellung der Materialoberflächenerfassung von in der Höhe befindlichen und so nur schwer zugänglichen Objekten innerhalb eines digitalen Monitorings durch den Sachbereich Dokumentation der LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen (LWL-DLBW) behandelt. Üblicherweise werden für ein solches Monitoring, so möglich, kosten- und zeitintensive Lösungen angewendet, wie der Einsatz von Baugerüsten oder Hubarbeitsbühnen, um die eine handzeichnerische und/oder digitale Untersuchung und Dokumentation in situ ausführen zu können.

Angedacht wird somit eine alternative zerstörungs- und berührungsfreie Verfahrensweise, die im Einsatz kosten- und zeitgünstiger ist. Das hierbei erarbeitete Verfahren soll zukünftig in zwei qualitativen Abstufungen die Erhebung reproduzierbarer Daten der sich wiederholenden Monitoring-Zyklen ermöglichen.

Bereits die hochaufgelöste digitale Erfassung des jeweiligen Ist-Zustands der Objektoberfläche unterstützt das Erkennen und/oder Verifizieren von veränderlichen Phänomenen im Rahmen des Monitorings.

Darüber hinaus wird unter Berücksichtigung aller verfügbarer digitaler Verfahren zur reinen Oberflächenerfassung und Detektion von mikrotopographischen Veränderungsprozessen in Form, Struktur und Quantität der Objektoberfläche nicht unmittelbar zugänglicher Objekte ein kombiniertes Verfahren als Teil einer Prozessbeschreibung zum digitalen Monitoring durch den Sachbereich Dokumentation der LWL-DLBW im Rahmen des Projekts erarbeitet.

Aufgrund der vielseitig einsetzbaren Möglichkeiten und des vergleichsweisen kostengünstigen Einsatzes wird als Lösungsansatz zur Datenerfassung das Structure from Motion-Verfahren (SfM) unter Einsatz eines unmanned aerial vehicle (UAV, umgangssprachlich „Drohne") sowie zum Datenabgleich der errechneten Punktwolken verfolgt.

Die Entwicklung des Dokumentationsverfahrens wird anhand eines maskenförmigen Elementes des figuralen Bauschmucks an der rückseitigen Giebelkrönung im Mittelrisalit der Westfassade am Schloss Münster (vgl. **Abb. 149**) erarbeitet und die Ergebnisse auf ihre breitenwirksame Anwendbarkeit hin untersucht.

Abb. 149: *Münster, Schloss, figuraler Bauschmuck (rote Markierung: dokumentierter Ausschnitt).*

8.3.2.2 Verfahrensbeschreibung

Structure from Motion (SfM) ist ein nicht-invasives Verfahren, das ohne direkte Interaktion zwischen der Struktur und einer anwendenden Person auskommt. Es ist als kombiniertes Verfahren der Photogrammetrie ein Teil der Computer Vision, das die digitale Rekonstruktion der dreidimensionalen Struktur eines Objekts mithilfe einer beliebigen Anzahl von zweidimensionalen Fotografien in Form von Messpunktwolke, Polygonnetz (Mesh) und texturiertem Modell ermöglicht.
Hierfür werden zunächst eine Reihe von Fotografien des Objektes UAV-gestützt aufgenommen. Diese Fotografien müssen aus verschiedenen Blickwinkeln und von variierenden Positionen aufgenommen werden, um eine umfassende Abdeckung der Oberfläche zu gewährleisten. Softwareseitig werden für jede Fotografie markante Merkmale punktuell extrahiert. Die extrahierten Merkmale werden zwischen den Fotografien gematcht.

Abb. 150: *Münster, Schloss, ornamentale Maske, Polygonnetz (höchste Qualitätsstufe).*

Basierend auf den korrespondierenden Merkmalen und einer Kamerakalibrierung wird eine vorläufige Punktwolke der Szene erstellt. Jeder Punkt in dieser Wolke repräsentiert die räumliche Position eines der erfassten spezifischen Merkmale der sichtbaren Oberflächen. Die errechneten Daten können weiter bis hin zu einem texturierten 3D-Modell prozessiert werden (vgl. **Abb. 150**). Der gesamte Prozess der Oberflächenerfassung im Structure from Motion-Verfahren erfordert eine präzise Datenerfassung (Fotografien, Messungen und Dokumentation), bedachte Bildbearbeitung, exakte Datenverarbeitung und eine technische Dokumentation.

8.3.2.3 Weiterentwicklung von Verfahrensschritten

Um die nötige Genauigkeit im Millimeterbereich und insbesondere die Reproduzierbarkeit der Erfassungsparameter zum angestrebten Abgleich erreichen zu können, werden verschiedene Verfahrensschritte zur Optimierung des Prozesses abweichend von üblichen Vorgehensweisen entwickelt. Eingesetzte Kamerasysteme ist Sony A7R III (Intel Falcon 8+ wird lediglich als Referenzsystem eingesetzt). Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Aspekte Objektivwahl, Voreinstellung der Kamerasysteme, Farbmanagement, Dateispezifikationen (u.a. RAW-Format, höchstmögliche Bildtiefe, größtmöglicher Farbraum, verlustfreie Komprimierung), automatisierte Optimierung der Rohdaten (zur Rauschminderung, Detailverbesserung und optischen Korrektur (DxO PureRAW 3.7. Die Ausgabe erfolgte als lineares DNG) und Entwicklung der optimierten Rohdaten (Lightroom LR 12.5 / Camera Raw 15.5) gelegt. Die Prozessierung der 3D-Datenberechnung zur Gewinnung der Messpunktwolke erfolgte in Agisoft Metashape (Agisoft Metashape Professional 1.6.4) oder RealityCapture (RealityCapture 1.3.1) erfolgt weitestgehend nach den herkömmlichen Arbeitsschritten im Bereich des Digital Cultural Heritage.
Als Dokumentationsprodukt für den Abgleich der Veränderungen der Oberfläche wird ein Polygonnetz verwendet. Verglichen werden zur besseren Darstellung die Zustände vor der Restaurierung und nach

Durchführung der restauratorischen Maßnahmen am Objekt. Zur direkten Differenzanalyse der erfassten Objektzustände wurden das berechnete Polygonnetz in Artec Studio (Software Version 18) und zur Kontrolle die Punktwolke in CloudCompare (Softwareversion 2.12.4 (Kyiv) eingelesen und miteinander verglichen.

8.3.2.4 Ergebnis

Abb. 151: *Münster, Schloss, texturiertes 3D-Modell des Nachzustands.*

8.3.2.5 Ergebnis

Das Ergebnis (**Abb. 152**) wird in diesem Fall farbcodiert in einer zuvor festgelegten Abstufung generiert. Für die Auswertung der Oberflächenveränderungen wird in diesem Beispiel, aufgrund der hohen Unterschiede, eine Skalierung von +5mm bis -5mm in einer Abstufung von 1 mm gewählt. Deutlich sind die quantitativen Zunahmen (Dunkelblau) an denen im Vorzustand Materialverluste festgestellt werden konnten und die im Nachzustand wieder eine Materialzunahme erfahren haben.
Aufgrund der Kürze der zurückliegenden Zeit seit der letzten Restaurierungsmaßnahme lässt sich zum Ende der Projektlaufzeit noch keine farbcodierte Visualisierung der Oberflächenveränderung von „frisch restauriertem" Zustand in Abgleich mit der Oberfläche nach sechsmonatiger Bewitterung erstellen.

Abb. 152: *farbcodierte Visualisierung der Oberflächenveränderung des untersuchten Objekts in Artec Studio.*

Neben der Generierung einer dichten Punktwolke zur Detektion von Veränderungen der Oberfläche werden maßhaltige Bildpläne zur weitergehenden Schadenskartierung und visuellen Kontrolle exportiert, kontrolliert bereinigt (vgl. **Abb. 153b**: rote Markierungen zeigen softwareseitig produzierte Fehlinformationen) und im Sinne einer Langzeitarchivierung abgelegt.

Abb. 153a: *Orthomosaik (rektifizierte Darstellung des 3D-Modells) nach der Restaurierung;* ***9b (rechts)****: Orthomosaik (rektifizierte Darstellung des 3D-Modells) vor der Restaurierung.*

8.3.2.6 Auswertung und Fazit

Das vorgestellte kombinierte bildgebende Dokumentationsverfahren – Structure from Motion-Verfahren (SfM) unter Einsatz eines unmanned aerial vehicle (UAV, umgangssprachlich „Drohne") zu Datenerfassung und Datenabgleich der errechneten Punktwolken – bietet bei Berücksichtigung und Anwendung der nötigen Parameter detaillierte Dokumentationsergebnisse der Objektoberflächen-Geometrien und somit indikative Analysen der Oberflächenveränderungen. So lassen sich anhand der im SfM-Verfahren berechneten Daten mittels Punktwolken- und Bildabgleich Veränderungen, Verformungen oder Verluste detektieren und es können entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Die Drohnenbefliegung kann somit Daten gewinnen, die ansonsten nur erheblich kostenintensiver oder aufgrund der nicht vorhandenen Zugänglichkeit gar nicht erfasst werden können. Weiterhin sind die prozessierten 3D-Daten für das Monitoring nachhaltig archivierbar und in beliebigen Intervallen wiederholbar.

8.3.3 Objektspezifisches Monitoring-Konzept: Fassade Schloss Münster

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Die Fassade des Schlosses Münster wird in den Jahren 2018 bis 2023 in verschiedenen Bauabschnitten restauriert, sowohl in den bildhauerisch bearbeiteten Bereichen als auch in den Bereichen der Werksteinflächen. Im Rahmen des Projekts wird beispielhaft ein Monitoring-Konzept entwickelt, um fortwährend kontinuierlich den Zustand der Oberflächen zu beobachten, zu prüfen und zu bewerten und nach Möglichkeit – ggfls. mit kleineren Maßnahmen – die langfristige Wirkung der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen gewährleisten zu können.
Für dieses Monitoring werden Referenzflächen in repräsentativen Bereichen ausgewählt. Dabei sollen unterschiedliche Schadensphänomene in Bereichen der Werksteinflächen sowie in bildhauerisch bearbeiten Bereichen, in denen aufgrund ihrer unterschiedlichen Schäden und Ausgangszustände unterschiedliche restauratorische Maßnahmen durchgeführt werden, beobachtet und bewertet werden sollen. In diesen Bereichen wird eine aufschlussreiche Aussage zur langfristigen Wirkung der verwendeten Materialien und Konservierungsmethoden erwartet. Etwa wie stark die Beschichtung zurückgewittert und wie gut die Anhaftung von Klebungen und Ergänzungen sind.

8.3.3.1 Auswahl repräsentativer Referenzflächen

Der große Gebäudekomplex des Schlosses hat stark unterschiedlich bewitterte Bereiche, die im Konzept berücksichtigt werden. Auf der Westfassade – zum Botanischen Garten hin – zeigt sich ein stärkerer Befall biogenen Bewuchses und das Schadensphänomen der Schalenbildung tritt verstärkt auf.
Auf der wetterabgewandten Ostseite hingegen ergibt sich durch den jeweils nördlichen und südlichen Gebäudeflügel eine U-Form, die einen Innenhof mit dem Haupteingang der Ostfassade und dem gepflasterten Platz bildet.
Darüber hinaus müssen die Referenzflächen für das Monitoring, das mittels direkter Betrachtung und zerstörungsfreier in situ-Untersuchungen beobachtet werden sollen, gut zugänglich sein, um eine praktische Durchführbarkeit gewährleisten und den Zeit- und Arbeitsaufwand möglichst gering halten zu können. In unzugänglichen Bereichen soll ein UAV-gestütztes SfM-basiertes Monitoring (vgl. Kap. 8.3.2) greifen.

Abb. 154: *Zuordnung der Referenzflächen in den verschiedenen Bereichen der Fassaden*

Die hier beispielhaft ausgewählten Referenzflächen sind aus verschiedenen Bereichen der Fassaden (vgl. **Abb. 154**) und repräsentieren die Hauptschadensmerkmale: Fehlstelle, Abschuppen, Schalenbildung und (**Tab. 72**).

8.3.3.2 Zielstellung und Parameter des Monitorings

Das Monitoring-Konzept an den Fassaden des Münsteraner Schlosses – Werksteinflächen und bildhauerisch bearbeitete Bereiche – zielt auf die Nachkontrolle der durchgeführten Maßnahmen ab. Somit soll an den repräsentativ ausgewählten Monitoring-Bereichen die jeweils durchgeführte Maßnahme überprüft werden.
Beispielhaft ausgewählt sind die Maßnahmen Rissinjektion, Schlämm-Auftrag, Schalenhinterfüllung und Ergänzung mit Steinersatzmasse aus verschiedenen Bereichen der Fassaden. Darauf aufbauend werden die folgenden Methoden zur Überprüfung im Rahmen des Monitorings gewählt (vgl. **Tab. 72**).
Das erste Intervall des Monitorings – also die Frequenz der Wiederholung des Monitorings – sollte hier drei Jahre betragen und im weiteren Verlauf sollte das Intervall dann wiederholt jeweils fünf Jahre betragen. Neben der Untersuchung und Dokumentation der einzelnen Monitoring-Bereiche werden auch die Rahmenbedingungen des jeweiligen Monitorings dokumentiert. Dazu gehören ganz praktische Dinge, wie die Maßnahmen zur Zugänglichkeit (z.B. Leiter, Hubsteiger, Gerüst) aber auch die Dokumentation der aktuellen Wetterbedingungen des jeweiligen Monitorings (insbes. Regen oder trockene Witterung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, mögl. Frostereignisse – auch nächtliche – etc.).

Tab. 72: *Monitoring-Methoden Schloss Münster.*

Monitoring-Methode	Monitoring-Bereich entsprechend der erfolgten Restaurierungsmaßnahme
optische Überprüfung (Flankenanhaftung, Haarrisse) ➔ Lokalisierung (Kartierung) und Bemaßung und Quantifizierung der Risse	Sämtliche Monitoring-Bereiche (Rissinjektion, Schlämm-Auftrag, Schalenhinterfüllung, Ergänzung mit Steinersatzmasse)
Fotografische Erfassung (Dokumentation und Abgleich) ➔ Lokalisierung (Kartierung), Bemaßung der Darstellung sowie Angabe der Kamera-Einstellungen, Beleuchtung/Lichtsituation	Sämtliche Monitoring-Bereiche (Rissinjektion, Schlämm-Auftrag, Schalenhinterfüllung, Ergänzung mit Steinersatzmasse)

Monitoring-Methode	Monitoring-Bereich entsprechend der erfolgten Restaurierungsmaßnahme
Kartierung (Dokumentation und Abgleich) ➔ Lokalisierung und grafische Darstellung der verschiedenen Untersuchungen auf zuvor festgelegten Kartierungsgrundlagen (Legende, Plan, Orthophoto, 3D-Scan)	Sämtliche Monitoring-Bereiche (Rissinjektion, Schlämm-Auftrag, Schalenhinterfüllung, Ergänzung mit Steinersatzmasse)
Farb- und/oder Grauwertmessung (Farbwertermittlung Oberflächenveränderungen) ➔ Detektion mittels Spektralphotometers und Graukarte	Oberflächen sämtlicher Monitoring-Bereiche
Abrieb-Test (Überprüfung der Kohäsion der Oberfläche/ der Adhäsion einer Beschichtung) Lokalisierung (Kartierung) und Angabe der Abriebmenge [g] relativ zur Prüffläche [cm^2]	Schlämm-Auftrag
Perkussions-Untersuchung (Ermittlung von Hohlstellen, Materialablösungen) ➔ Lokalisierung (Kartierung) und Beschreibung des akustischen Eindrucks (hohl, „scheppernd")	Rissinjektion Schalenhinterfüllung Ergänzung mit Steinersatzmasse
Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (Wirkung der erfolgten Maßnahme) ➔ W-Wert-Ermittlung	Schlämm-Auftrag, Ergänzung mit Steinersatzmasse
ggfls. ***Messen der Ultraschall-Laufzeit*** (mögl. Veränderungen des Gefüges/an Materialgrenzflächen) ➔ Lokalisierung (Kartierung) und Angabe der Laufzeit [km/s]	Rissinjektion Schalenhinterfüllung Ergänzung mit Steinersatzmasse
ggfls. ***Bohrwiderstandsmessung*** (Ermittlung von Festigkeitsprofilen) ➔ Lokalisierung (Kartierung) und Bohrwiderstandsprofil (grafischer Kurvenverlauf)	Schalenhinterfüllung, Schlämm-Auftrag, Ergänzung mit Steinersatzmasse
Ggfls. **Untersuchung bauschädlicher Salze** (Schadsalzbelastung) ➔ Quantitative/semiquantitative Salzanalytik	Sämtliche Monitoring-Bereiche (Rissinjektion, Schlämm-Auftrag, Schalenhinterfüllung, Ergänzung mit Steinersatzmasse)
Ggfls. **Mikrobiologisches Monitoring** (Mikrobieller Befall) ➔ Klassifizierung in: nicht schädlich, mittelfristig schädlich, unmittelbar schädlich	Oberflächen sämtlicher Monitoring-Bereiche

8.3.3.3 Monitoring an Referenzflächen Schloss Münster

Referenzfläche 1, Schloss Münster	
Abb. 155: *Putto – Schuppen-, Schalen-, Rissbildung (Foto: M.Schmidt)*	***Abb. 156:*** *Mörtelergänzung (Foto: M.Schmidt)*

Lageplan	**Beschreibung der Position**
	Westfassade, Mittelrisalit, Giebel Höhe: ca. 22 m üFBN
Schadensphänomen	Fehlstelle
Maßnahme **Datum:** 2022	Partielle Festigung im Injektionsverfahren (KSE) Ergänzung mit mineralisch gebundener Steinersatzmasse *(ggfls. Armierung mit Epoxidharz-verklebten Edelstahlankern)*
Monitoring	• optische Überprüfung des Zustands der Ergänzung, auf Haarrisse • Fotografische Erfassung • Kartierung • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion im Oberflächenbereich der Ergänzung • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allgemeinen Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessung zur Detektion fehlender Adhäsion • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze • Mikrobiologisches Monitoring (allgemeine Feststellung)
Intervall	beginnend mit 3 Jahren, dann 5 Jahre
Zugänglichkeit	z.B. Leiter, Hubsteiger, Gerüst
Wetterbedingungen (des Monitoring)	z.B. Regen oder trockene Witterung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, mögl. Frostereignisse – auch nächtliche – etc.

Referenzfläche 2, Schloss Münster	
Abb. 157: Abschuppen (Foto: M.Schmidt)	***Abb. 158:** Schlämmauftrag (Foto: M.Schmidt)*

Lageplan	**Beschreibung der Position**
	Nordflügel, Ostfassade, Giebel, zentrale Bauplastik Höhe: ca. 20 m üFBN
Schadensphänomen	Abschuppen
Maßnahme **Datum:** 2022	Partielle Festigung im Injektionsverfahren (KSE) Auftrag einer rissverschließenden Schlämme als Schutz- und Opferschicht
Monitoring	• optische Überprüfung des Zustands der Schlämm-Oberfläche • Fotografische Erfassung • Kartierung • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allgemeinen Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessung • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze • Mikrobiologisches Monitoring (allgemeine Feststellung)
Intervall	beginnend mit 3 Jahren, dann 5 Jahre
Zugänglichkeit	z.B. Leiter, Hubsteiger, Gerüst
Wetterbedingungen (des Monitoring)	z.B. Regen oder trockene Witterung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, mögl. Frostereignisse – auch nächtliche – etc.

Referenzfläche 3, Schloss Münster	
Abb. 159: *Schalenbildung (Foto: M.Schmidt)*	***Abb. 160:*** *gesicherte, hinterfüllte und geschlossene Schale (Foto: M.Schmidt)*

Lageplan	**Beschreibung der Position**
	Hauptgebäude, Ostfassade, Giebelkrönung Höhe: ca. 22 m üFBN
Schadensphänomen	Schalenbildung
Maßnahme **Datum:** 2022	Punktuelle Epoxidharz-Verklebung Hinterfüllen mit mineralischem Injektionsmörtel Schließen der Ränder der Schale Auftrag einer rissverschließenden Schlämme als Opferschicht
Monitoring	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Fotografische Erfassung • Kartierung • Grauwertmessung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Anböschung und des Schlämm-Auftrags • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allgemeinen Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze • Mikrobiologisches Monitoring (allgemeine Feststellung)
Intervall	beginnend mit 3 Jahren, dann 5 Jahre
Zugänglichkeit	z.B. Leiter, Hubsteiger, Gerüst
Wetterbedingungen (des Monitoring)	z.B. Regen oder trockene Witterung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, mögl. Frostereignisse – auch nächtliche – etc.

8.3.3.4 Ergebnisse und Auswertung des Monitorings

Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden fotografisch, kartografisch, textlich und in tabellarischen Messprotokollen festgehalten und als Monitoring-Bericht zusammengefasst. Wichtig dabei ist, dass jedes Monitoring nach dem jeweils beschriebenen Intervall mit gleichbleibenden Grundlagen arbeitet, damit eine Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann.

Zeigt ein Monitoring leichte Veränderung, die noch keine Schädigung bedeuten, so sind diese Veränderungen im Kontext vorhergehender Monitorings zu bewerten, um einen möglichen progressiven Verlauf der Veränderung nachvollziehen und bestenfalls auf Prognosen das zukünftige Handeln festzulegen. Hier kann möglicherweise ein anderes Intervall der zukünftigen Monitorings festgelegt werden.
Anhand der über mehrere Jahre durchgeführten Monitorings kann möglicherweise auch festgestellt werden, eine zukünftige Wartungsmaßnahme zu planen (z.B. Oberflächenreinigung, Erneuerung von Beschichtung, Dachreparaturen, o.ä.), um große und substanzielle, kostenintensive Eingriffe zu vermeiden.
Zeigt ein Monitoring starke Veränderungen und schadhafte Entwicklungen am Objekt, so ist die Zustands-Überprüfung auf weitere Bereiche auch außerhalb der Referenzfläche zu erweitern, um mögliche Wartungs- oder Reparaturarbeiten planen zu können.

8.3.4 Objektspezifisches Monitoring-Konzept: Musterfläche

(Birte Graue, LWL-DLBW)

An der Musterfläche am Pfeiler auf Haus Stapel wird die Schadenserfassung anhand des Modularen Untersuchungsprogramms (MODUL : ERKENNEN) durchgeführt (vgl. Kap. 6.10). Darauf aufbauend werden Erhaltungsstrategien entwickelt und Maßnahmen durchgeführt (MODUL : HANDELN) (vgl. Kap. 7.7). Analog zum Modularen Management (vgl**.** Kap. 1) wird das Monitoring (MODUL : PFLEGEN) auf Basis der durchgeführten Maßnahmen geplant.

8.3.4.1 Zielstellung und Parameter des Monitorings

Das Monitoring-Konzept für die Musterfläche am Pfeiler auf Haus Stapel – Werksteinflächen – zielt auf die Nachkontrolle der durchgeführten Maßnahmen ab. Darauf aufbauend werden die folgenden Methoden zur Überprüfung im Rahmen des Monitorings gewählt (vgl. **Tab. 73**).
Das Monitoring wird hier an der gesamten Musterfläche durchgeführt, es werden keine gesonderten, repräsentativen Monitoring-Bereiche (Referenzflächen) ausgewählt. Das maßnahmenspezifische Monitoring erfolgt entsprechend in den Bereichen der jeweiligen Maßnahme auf Grundlage der Maßnahmen-Kartierung (vgl. Kap. 7.7.15).
Die Musterfläche wird einem engmaschigen Monitoring unterzogen, um zum einen die Maßnahmen aber auch zum anderen das Modulare System des Leitfadens zu evaluieren. In den ersten drei Jahren ist das Intervall des Monitorings jährlich, danach folgt 1-2 Mal ein dreijähriges Intervall, anschließend wird im Abstand von 5 Jahren das Monitoring durchgeführt.
Neben der Untersuchung und Dokumentation der einzelnen Monitoring-Bereiche werden auch die Rahmenbedingungen des jeweiligen Monitorings dokumentiert. Dazu gehört vor allem die Dokumentation der aktuellen Wetterbedingungen des jeweiligen Monitorings (insbes. Regen oder trockene Witterung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonneneinstrahlung, mögl. Frostereignisse – auch nächtliche – etc.) aber auch andere Auffälligkeiten oder Rahmenbedingungen.

Tab. 73: *Entwicklung des Monitoring-Programms für die Musterfläche anhand des Leitfadens Modulares Management.*

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN
Detektierter Schaden	Durchgeführte Maßnahme	Avisierte Monitoring-Methoden
Oberflächenverschmutzung. Algen, Flechten, Moose	Oberflächenreinigung, Entfernen biologischen Befalls	optische Überprüfung des Zustands der Oberflächen Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Oberfäche Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) Mikrobiologisches Monitoring (allgemeine Feststellung)
Oberflächenverschmutzung: Verschwärzung, Salze	Oberflächenreinigung, Reduzierung schwarzer Krusten	optische Überprüfung des Zustands der Oberflächen Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Oberfäche Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Risse/Rissnetze	Rissinjektion, Verkleben und Rissverschluss	optische Überprüfung der Flankenanhaftung der Rissverfüllung und auf Haarrisse Perkussions-Untersuchung zur Überprüfung der Verfüllung der Risse Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit
Abgängige Schalen	Abnahme loser Schalen und Schuppen Fixierung der Schalen Schalenhinterfüllung Anböschung/Schlämme	optische Überprüfung auf Haarrisse Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion der Anböschung und des Schlämm-Auftrags Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Frühere Maßnahmen (Steinergänzung- Mörtel/Metall)	Entfernung zementärer Mörtel und rostiger Dübel/ Klammern Ergänzungen mit Steinersatzmörtel (m/o Armierung)	optische Überprüfung des Zustands der Ergänzung, auf Haarrisse Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion im Oberflächenbereich der Ergänzung Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessung zur Detektion fehlender Adhäsion
Materialverlust/Bruchstücke	Fixierung von Bruchstücken mit punktuellen Epoxidharz-Klebungen	optische Überprüfung auf Haarrisse Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN
Detektierter Schaden	Durchgeführte Maßnahme	Avisierte Monitoring-Methoden
	Rissverschluss	Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion
Materialverlust/Fehlstellen	Ergänzungen mit Steinersatzmörtel (m/o Armierung)	optische Überprüfung des Zustands der Ergänzung, auf Haarrisse Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion im Oberflächenbereich der Ergänzung Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion
Abmehlen/Absanden Abschuppen/Mürbzone	Partielle Festigung (KSE) Auftrag einer rissverschließenden Schlämme als Schutz- und Opferschicht	optische Überprüfung des Zustands der Schlämm-Oberfläche Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessung optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Materialverlust/Fehlstellen	Vierungen aus Naturstein Klebung Rissverschluss	optische Überprüfung auf Haarrisse Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion
Materialverlust/Fehlstellen	Quaderaustausch Fugenverschluss	optische Überprüfung der Fugen Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen/Lockerung des Quaders Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung)
Offene/defekte Fugen	Fugenaustausch mit Kalkmörtel	Optische Überprüfung und durch Abklopfen der Fugen

In sämtlichen Bereich erfolgt eine ● Fotografische Erfassung und die ● Kartierung.

8.3.4.2 Ergebnisse und Auswertung des Monitorings

Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden fotografisch, kartografisch, textlich und in tabellarischen Messprotokollen festgehalten und als Monitoring-Bericht zusammengefasst. Wichtig dabei ist, dass jedes Monitoring nach dem jeweils beschriebenen Intervall mit gleichbleibenden Grundlagen arbeitet, damit eine Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann.
Im Rahmen der einzelnen Monitorings erfolgt die Bewertung möglicher Veränderungen oder Schäden. Zeigt ein Monitoring leichte Veränderung, die noch keine Schädigung an sich bedeuten, so sind diese Veränderungen im Kontext vorhergehender Monitorings zu bewerten. Dies ermöglicht, einen eventuell bestehenden progressiven Verlauf der Veränderung erkennen zu können und Prognosen für ein zukünftiges Handeln zu geben.

Möglicherweise lässt sich anhand der über mehrere Jahre durchgeführten Monitorings eine Abschätzung treffen, ob bei bestimmten Maßnahmen in erwartbaren – und damit planbaren –Zeiträumen Wartungsmaßnahmen erfordern (z.B. Oberflächenreinigung, Erneuerung von Beschichtung, begleitende Reparaturarbeiten, etc.), um große und substanzielle und damit kostenintensive Eingriffe zu vermeiden. Zeigt das Monitoring an der Musterfläche starke Veränderungen und schadhafte Entwicklungen in Bereichen bestimmter Maßnahmen, so kann diese Feststellung zur Evaluierung der Maßnahme nach dem Prinzip des Baukasten-Systems und einer möglichen Verbesserung beitragen.

Neben der eigentlichen Bewertung des Objektzustands und der grundlegenden Bewertung einzelner Maßnahmen im Baukasten-Prinzip soll dieses Monitoring an der Musterfläche am Pfeiler der Vorburg auf Haus Stapel zur Evaluation des MODUL : PFLEGEN des Leitfadens Modulares Management: *RESTAURIERUNG 3.0* (vgl. Kap. 1) dienen.

8.4 Modulares Monitoring Programm

(Birte Graue, LWL-DLBW)

Die Erfahrung der denkmalpflegerischen Praxis zeigt, dass Objekte aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein wiederholt nach wenigen Jahrzehnten – mitunter bereits nach einigen Jahren – einen fortgeschrittenen Schaden und Substanzverlust aufweisen, die eine erneute umfangreiche und teure Restaurierung oder Sanierung erforderlich machen.

Die im Baumberger Kalksandstein ablaufenden Schadensprozesse resultieren meist in dem komplexen Zusammenspiel von Porenraum- und Gefügeparametern, der Mineralkomposition und den mit diesen Aspekten wechselwirkenden Wassertransporteigenschaften. Den hier ablaufenden Prozessen hat der Baumberger Kalksandstein aufgrund seiner geringen Bindungseigenschaften wenig Festigkeit entgegen zu setzen, so dass in der Regel Ermüdungs- oder Zermürbungsprozesse stattfinden. Diese Eigenschaften und die daraus resultierenden Faktoren haben einen wesentlichen Beitrag zur geringen Verwitterungsresistenz von Baumberger Kalksandstein. Aufgrund dieser witterungsbedingten Bewegtheit des Materials Baumberger Kalksandstein verwundert es nicht, dass es auch nach relativ kurzen Zeiträumen zu Veränderungen und Schäden kommt. Letztendlich war diese Erkenntnis sicherlich auch Teil der Hydrophobierungsmaßnahmen früherer Zeit, die leider ihr Ziel verfehlt haben.

Ein Monitoring von Objekten aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein hat die Beobachtung und Bewertung früherer Maßnahmen zum Ziel, um deren langfristige Wirkung bewerten bzw. diese durch geeignete kleinere Maßnahmen gewährleisten zu können.

Das Projekt wie der Leitfaden folgen einem modularen Konzept und dem Verständnis, dass eingangs der jeweilige Objektzustand verstanden werden muss, um adäquate Maßnahmen konzipieren und durchführen zu können und diese dann entsprechend beobachtet, bewertet und gewartet werden müssen, um einen langfristig wirksamen Erhalt zu erzielen. Für ein Modulares Monitoring Programm bedeutet dies, dass diese drei Aspekte einer logisch konsequenten Systematik folgen: der Schaden bewirkt die Maßnahme, die Maßnahme bewirkt das Monitoring. So zielt das Monitoring auf die Nachkontrolle der durchgeführten Maßnahmen ab, die die Monitoring-Methoden bestimmen (vgl. **Tab. 74**).

Die Tabelle 4 beschreibt das Modulare Monitoring-Programm. Um ein zielgerichtetes Monitoring durchzuführen, kann sowohl ausgehend vom jeweiligen Schaden oder aber auch von der entsprechend durchgeführten Maßnahme die zugeordnete Monitoring-Methode gewählt und geplant werden. Darüber hinaus soll anhand der Beschreibung der schadhaften Veränderung aufgezeigt werden, welche Veränderung beobachtet und bei starker Zunahme zur Schädigung führen kann, also ein Handeln erfordert, bevor der Schaden auftritt. Dabei ist die Abgrenzung von Veränderung zu Schaden fließend und abhängig von weiteren Faktoren des jeweiligen Objektbereichs.

Tab. 74: *Modulares Monitoring-Programm.*

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN	
Detektierter Schaden	**Durchgeführte Maßnahme**	**Schadhafte Veränderung**	**9. Avisierte Monitoring-Methoden**
Oberflächenver-schmutzung: Biologische Besiedelung Algen, Flechten, Moose	Oberflächenreinigung, Entfernen biologischen Befalls	Stärkere biologische Besiedlung	• optische Überprüfung des Zustands der Oberflächen • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Oberfläche • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • Mikrobiologisches Monitoring (allgemeine Feststellung)
Oberflächenver-schmutzung: Verschwärzung	Oberflächenreinigung, Reduzierung schwarzer Krusten, Salzreduzierung	Verstärkte Schmutzablagerungen, Schmutzkruste	• optische Überprüfung des Zustands der Oberflächen • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Oberfläche • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit zur Überprüfung mögl. Entfestigungen • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Salze, Salzausblühungen, Salzkrusten, strukturelle Schäden (Absanden, Abschuppen)	Oberflächenreinigung, Reduzierung schwarzer Krusten, Salzreduzierung	Salzausblühungen, strukturelle Schäden, Entfestigung Absanden, Abschuppen	• optische Überprüfung des Zustands der Oberflächen • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Oberfläche • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit zur Überprüfung mögl. Entfestigungen • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen: Festigkeitsprofil • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Risse/Rissnetz	Rissinjektion, Verkleben und Rissverschluss	Rissöffnung, Flankenabriss	• optische Überprüfung der Flankenanhaftung der Rissverfüllung und auf Haarrisse • Rissmonitor (analog oder digital) • Perkussions-Untersuchung zur Überprüfung der Verfüllung der Risse • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit
Abgängige Schalen	Abnahme loser Schalen und Schuppen Fixierung der Schalen Schalenhinterfüllung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Schale	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion der Anböschung und des Schlämm-Auftrags • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN	
	Anböschung/Schlämme		• Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Schalenbildung	Fixierung der Schalen durch Klebung/Vernadelung Schalenhinterfüllung Anböschung/Schlämme	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Ablösen Korrosion Verlust der Schale	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion der Anböschung und des Schlämm-Auftrags • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Frühere Maßnahmen (Steinergänzung-Mörtel/Metall)	Entfernung zementärer Mörtel und rostiger Dübel/ Klammern Ergänzungen mit Steinersatzmörtel (m/o Armierung)	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Ergänzung	• optische Überprüfung des Zustands der Ergänzung, auf Haarrisse • Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion im Oberflächenbereich der Ergänzung • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessung zur Detektion fehlender Adhäsion
Materialverlust/ Bruchstück	Fixierung von Bruchstücken mit punktuellen Epoxidharz-Klebungen Rissverschluss	Verlust der Adhäsion, Ablösen	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion
Materialverlust/ Fehlstellen	Anböschungen mit Restauriermörtel	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Anböschung	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion der Anböschung • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN	
Materialverlust/ Fehlstelle	Ergänzungen mit Steinersatzmörtel (m/o Armierung)	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion, Verlust der Ergänzung	• optische Überprüfung des Zustands der Ergänzung, auf Haarrisse • Abrieb-Test: Kohäsion und Adhäsion im Oberflächenbereich der Ergänzung • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion
Abmehlen/Absanden Abschuppen/Mürbzone	Partielle, strukturelle Festigung (KSE) Auftrag einer rissverschließenden Schlämme als Schutz- und Opferschicht	Verlust der Kohäsion Entfestigung Absanden, Abschuppen	• optische Überprüfung des Zustands der Schlämm-Oberfläche • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessung • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Materialverlust/ Fehlstelle	Vierungen aus Naturstein Klebung Rissverschluss	Flankenabriss bis Öffnung der Fuge Verlust der Adhäsion Lockerung der Vierung	• optische Überprüfung auf Haarrisse • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • ggfls. Messen der Ultraschall-Laufzeit • ggfls. Bohrwiderstandsmessungen zur Detektion fehlender Adhäsion • Rissmonitor (analog oder digital)
Materialverlust/ Fehlstelle	Quaderaustausch Steinaustausch Fugenverschluss	Unverträglichkeit, Flankenabriss bis Öffnung der Fuge, Bildung bauschädlicher Salze Lockerung des Quaders	• optische Überprüfung der Fugen • Perkussions-Untersuchung zur Detektion möglicher Hohlstellen/Lockerung des Quaders • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Offene/defekte Fugen	Fugenaustausch mit Kalkmörtel, Neuverfugung	Flankenabriss bis Öffnung der Fuge, Verlust des Fugenmörtels	• Optische Überprüfung und durch Abklopfen der Fugen

MODUL : ERKENNEN	MODUL : HANDELN	MODUL : PFLEGEN	
Blasenbildung, Aufwölbung (Beschichtung)	Partielle Festigung (KSE) Ergänzung der schadhaften Beschichtung oder ftrag einer rissverschließenden lämme als Schutz- und ferschicht	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion der Beschichtung, Verlust der Beschichtung strukturelle Schäden, Entfestigung	• optische Überprüfung des Zustands der Beschichtung/Schlämm-Oberfläche • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Schutz- und Opferschicht allgemein reduzierte Oberfläche Schädigung früherer Beschichtung	Auftrag einer Kalkschlämme als Schutz- und Opferschicht	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion der Beschichtung, Verlust der Beschichtung	• optische Überprüfung des Zustands der Beschichtung/Schlämm-Oberfläche • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Schutz- und Opferschicht allgemein reduzierte Oberfläche Schädigung früherer Beschichtung	Auftrag einer Silikonharzbeschichtung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion der Beschichtung, Verlust der Beschichtung	• optische Überprüfung des Zustands der Beschichtung/Schlämm-Oberfläche • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze
Schutz- und Opferschicht allgemein reduzierte Oberfläche Schädigung früherer Beschichtung	Auftrag einer silikatischen Beschichtung	Verlust der Adhäsion und/oder Kohäsion der Beschichtung, Verlust der Beschichtung	• optische Überprüfung des Zustands der Beschichtung/Schlämm-Oberfläche • Grauwertmessung, ggfls. Farbwertermittlung • Abrieb-Test Überprüfung der Kohäsion und Adhäsion der Beschichtung • Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (zur allg. Zustandsbestimmung) • optische Überprüfung auf bauschädliche Salze

In sämtlichen Bereichen muss eine ● Fotografische Erfassung und eine ● Kartierung erfolgen.

9. Ergebnisse – Erkenntnisse

(Birte Graue; LWL-DLBW)

Die im Projekt von allen Projektbeteiligten durchgeführten umfangreichen Untersuchungen, Erfassungen und Maßnahmen zeigen zum einen Handlungsoptionen in Sinn eines praxisorientierten Handlungsleitfadens auf und bringen zum anderen zu verschiedenen Gesichtspunkten neue Erkenntnisse.

9.1 Bedeutung: „hydrophobiertes Objekt"

Ausgangssituation des Projekts ist die Befassung der durch Althydrophobierung vorgeschädigten Objekte, was zu Beginn die Frage aufwirft, was genau unter einem hydrophobierten Objekt zu verstehen ist.

Die Aktenlage zur Restaurierungsgeschichte der verschiedenen Objekte zeigt eine sehr unterschiedlich gute Dokumentation früherer Maßnahmen, wobei selten bis nie eine Beschreibung einer tatsächlich durchgeführten Hydrophobierungs-Maßnahmen mit Angabe von Art, Menge und Applikationsmethode von Hydrophobierungsmitteln vorliegt. Somit kann aufgrund der Aktenlage keine reproduzierbare Aussage zur Hydrophobierung eines Objektes getroffen werden. Es sind Verweise auf wasserabweisende Imprägnierungen oder auch als Hydrophobierung oder Festigung mit Hydrophobierung benannte Maßnahmen zu finden. Eine genauere Lokalisation oder auch Angabe, über welche Methode wie viel Hydrophobierungsmittel eingebracht wurde, fehlen.

Aus diesen – wenn auch nach heutigen Gesichtspunkten inkonsistenten Dokumentationen – ist die flächenhafte Anwendung von Hydrophobierungsmitteln für Westfalen bekannt und die behandelten Objekte weisen hydrophobe Oberflächeneigenschaften auf. Es sind an den Objekten in der Regel sehr heterogene Objektzustände von hydrophoben zu hydrophilen Oberflächeneigenschaften festzustellen, die sich auch im Tiefenprofil der Steine zeigen.

Diese hydrophob/hydrophilen Objektzustände weisen auf drei Besonderheiten hin.

- Insbesondere im Tiefenprofil sind oberflächenparallele Schichtungen mit unterschiedlich hydrophob/hydrophilen Eigenschaften festzustellen, die den Schadensprozess der Schalenbildung negativ verstärken können.
- Die Heterogenität der hydrophob/hydrophilen Objektzustände stellt eine besondere Herausforderung an Konservierungsmittel dar. Zum einen muss auch auf hydrophoben Untergründen eine ausreichende Haftung der angewandten Mittel gegeben sein. Zudem hat das umgebende hydrophobe Steinmaterials kein ausreichendes Wasservorhaltevermögen, was gerade bei Verwendung von mineralischen/kalkgebundenen Massen eine besondere Nachversorgung der durchgeführten Maßnahme bedeutet (vgl. Kap. 7.7.1).
  Da diese alternierenden hydrophob/hydrophilen Objektzustände im Tiefenprofil in dünnen Schichten auftreten – einer ca. 1–2 mm starken hydrophilen Oberfläche folgt eine, einige Millimeter dicke, hydrophobe Schicht, an die wiederum nicht hydrophobe Steinsubstanz anschließt, dem Anschein nach in ursprünglichem Zustand des Steinmaterials, – ist von einer unzureichenden Durchtränkungstiefe der Hydrophobierungsmittel auszugehen. Die Tränkungsversuche mit aktuellen Hydrophobierungsmitteln unter Laborbedingungen zeigen einen maximalen Durchtränkungshorizont von 1–2 mm. Selbst unter Vakuum lassen sich die 8 mm dicken Proben nur mit einem der beiden getesteten Mittel vollständig durchtränken (vgl. Kap. 6.6.3). Diese mangelnden Tränkungstiefen sind ein deutlicher Hinweis, dass von einer sogenannten „Nach-Hydrophobierung" als abschließender Arbeitsschritt einer aktuellen Konservierungsmaßnahme abzusehen ist.

9.2 Verwitterungsprozesse in Baumberger Kalksandstein

Abschuppen und Schalenbildung sind typische Verwitterungsphänomene in Baumberger Kalksandstein. Abschuppen kann im Zusammenhang mit Salzbelastungen im Stein gesehen werden (vgl. Kap.6.5.3), die sich aufgrund der früheren Schwefeloxidbelastungen der Umwelt gebildet haben. Oftmals sind die Salze makroskopisch nicht erkennbar, mitunter jedoch sind Salzbelastungen anhand aufliegender schwarzer Krusten zu erkennen. Die Horizonte der Salzbelastung reichen aufgrund kapillaren Transporst einige Millimeter in die Tiefe des Steinmaterials, wo sie kristallisieren und akkumulieren, was zur Zerrüttung und zum Abschuppen des Steinmaterials führt.
Die Korrelation des Schadensphänomens „Abschuppen" zu einer weiterhin bestehenden Salzbelastung legt eine Salzreduzierung als einleitende Maßnahme einer Konservierung/Restaurierung nahe.

Schalenbildung – das Ablösen oberflächenparalleler Schichten von mehreren Millimetern bis zu 1–3 cm Dicke – kann mit dem Wassertransportverhalten von Baumberger Kalksandstein gesehen werden. Die kapillare Wasseraufnahme in den oberflächennahen Bereich erfolgt zugig, verzögert sich jedoch mit zunehmender Zeit und damit Tiefe im Gestein. Hier wäre genauer zu betrachten, ob dies im Zusammenhang mit der Volumenzunahme quellfähiger Schichtsilikate (Tonminerale), mit dem hohen Anteil an Mikroporen oder mit einem nicht ausreichend vernetzten Porenraum steht.
Die Aufkonzentration im oberflächennahen Bereich führt in dem tonig-mikritischen Bindemittel zu Lockerung im Grenzbereich, was durch Ermüdungserscheinung zur Schichtentrennung und damit Schalenbildung führen kann. Einen gravierenden Einfluss auf die Schädigung des Materials hat hier die Frostempfindlichkeit von Baumberger Kalksandstein (vgl. Kap. 5.7): im oberflächennahen Bereich und insbesondere in der bereits entfestigten Grenzfläche gefriert Wasser im Steingefüge, was zur Zerrüttung und Schalenbildung führen kann. Zudem zeugen die festgestellten Salzbelastungen (vgl. Kap. 6.5.3.1) davon, dass die Salzbelastung den Schadensprozess der Schalenbildung durch Akkumulation und Kristallisation der Salze verstärken kann.

Die Untersuchungen zu Dilatationsmessungen an Baumberger Kalksandstein (vgl. Kap. 5.6) zeigen signifiaknte Werte der hydrischen Dilatation. Insbesondere das unterschiedliche richtungsabhängiges Verhalten – Anisotropie – kann Schadensprozesse negativ verstärken. Bezieht man in diese Betrachtung das Wassertransportverhalten und eine mögliche ungleiche Verteilung des Wassergehalts im Gestein mit ein, so kann es nachvollziehbar zu Spannungen und Scherkräften kommen, die eine Schalenbildung verursachen können.

Betrachtet man den möglichen Einfluss von Hydrophobierungen im Baumberger Kalksandstein, so sind geringe Wasseraufnahmen und die Zunahme von Festigkeiten, jedoch auch höhere E-Moduli festzustellen, die eine geringere Elastizität des Materials und eine geringe Widerstandskraft gegenüber Spannungen bedeuten (vgl. Kap. 6.6.5). Abschuppen und Schalenbildung sind Schäden, die aufgrund von Scherkräften und Spannungen im Material auftreten, insofern ist davonauszugehen, dass Hydrophobierungen und die daraus resultierenden hydrophob/hydrophilen Objektzustände die Schädigungsprozesse in Baumberger Kalksandstein negativ verstärken.

Besonders deutlich wird die schadensverstärkende Wirkung von Hydrophobierungen in Baumberger Kalksandstein durch die Untersuchungen zu thermischer und hygrischer Dilatation von Baumberger Kalksandstein im Vergleich von unbehandelten zu mit Hydrophobierungsmittel behandelten Proben (vgl. Kap. 6.6.7). Die Anisotrope der Dilatation – das unterschiedliche richtungsabhängiges Verhalten der Proben – verstärkt sich nach der Behandlung mit einem Hydrophobierungsmittel. Das unterschiedliche Dehnungsverhalten der mit Hydrophobierungsmittel behandelten zu unbehandelten Proben kann die Scherkräfte insbesondere an den hydrophob/hydrophilen Grenzflächen intensivieren. Die erhöht

auftretenden Spannungen können aufgrund geringerer Elastizität der hydrophobierten Bereiche schlechter abgefangen werden und können zur Trennung und Schalenbildung führen.

9.3 Schloss Münster Status quo und quo vadis\ Schadensprognose und- verlauf

Das Schloss Münster als eines der prominentesten Denkmäler aus Baumberger Kalksandstein ist bereits seit vielen Jahren immer wieder im Fokus von Untersuchungen und Maßnahmenkonzeptionen gewesen. Im Bericht von 1996 werden verhärtete Oberflächen mit darunter befindlichen sandenden Zonen beschrieben (HELLBRÜGGE, 1996, S.2). „Die nur zum Teil abgelösten Steinschichten bilden Schalen, die einen Hohlraum zwischen der sich ablösenden Schicht und dem darunter befindlichen Kernmaterial aufweisen. In diesen Hohlräumen ist es zu Ansammlungen von Lockermaterial gekommen." (HELLBRÜGGE, 1996, S.3)

Neben Festigung sandender Bereiche und Anböschungen werden Schalenhinterfüllung und Rissverschluss empfohlen (HELLBRÜGGE, 1996, S.3ff). Eine Maßnahme kommt lt. aktenlage nicht zur Ausführung.

In einem Bericht zum Erhaltungszustand aus dem Jahr 2013 wird beschrieben, dass von einer „deutlich exponentiellen Schadensentwicklung auszugehen ist" (HILBERT & LEHMKUHL, 2013, S. 96). Insbesondere werden das „deutlich heterogene Saugverhalten" und die „Tendenz zur einer überfestigten Oberfläche, mit einer sich darunter befindenden subkrustalen Lockerzone" angesprochen (HILBERT & LEHMKUHL, 2013, S. 98). Erstes wird im Kontext einer „erheblichen flächigen Hinterfeuchtungsgefahr" gesehen, die es gilt, „durch Vereinheitlichung der Saugfähigkeit aufzulösen" (HILBERT & LEHMKUHL, 2013, S. 98). Gleichwohl wird festgestellt, dass „die Oberflächen im Verhältnis zu der nachgewiesenen Heterogenität in der Saugfähigkeit bisher verhältnismäßig wenig Schäden aufweisen" (HILBERT & LEHMKUHL, 2013, S. 96).

Neben einer Fugensanierung, Salzreduzierung, Festigung und Ergänzungen mit Steinersatzmassen sowie Vierungen wird der „Eintrag einer hydrophob wirkenden Grundierung" und der „Auftrag einer Farblasur" empfohlen (HILBERT & LEHMKUHL, 2013). Eine Maßnahme kommt lt. Aktenlage nicht zur Ausführung.

Im Bericht zur Sanierung der Ostfassade des Schlosses Münster aus dem Jahr 2020, der auf eine Untersuchung aus dem Jahr 2017 fußt, wird Schalenbildung als markantes Schadensphänomen benannt. Hier wird sie als Folge früherer Hydrophobierungsmaßnahmen mit einem dichteren/verfestigten Oberflächenbereich von ca. 3–4 mm und darunterliegender Mürbzone beschrieben (SCHMIDT, 2020, S.15).

Als durchgeführte Maßnahmen an der Musterfläche werden die Abnahme von aufliegendem Schmutz und Krustenreduzierung als Salzminderung sowie Fixierung von Schalen und Sicherung der Schalenränder durch Anböschungen beschrieben. Fehlstellen werden zurückhaltend durch Vierungen geschlossen, desolate Quader werden in Naturstein ausgetauscht. Abschließend erfolgt ein Schlämm-Auftrag auf Kalkbasis als Schutz- und Opferschicht. (SCHMIDT, 2020)

Auf Basis dieser Musterfläche sind die weiteren Bauabschnitte am Schloss Münster geplant und durchgeführt worden. Eine Dokumentation zu den Arbeiten steht zum Zeitpunkt der Fertigstellung des vorliegenden Berichts noch aus.

Betrachtet man die ausgeführten Maßnahmen an der Musterfläche, so wird eine klare Orientierung zu konservatorisch-restauratorischem Vorgehen eingeschlagen. Die 2013 formulierte Befürchtung eines exponentiell verschärfenden Schadensverlaufs relativiert sich dahingehend, dass sich die Schäden nicht so stark exponentiell zu verschärfen scheinen, wie die Schadsituationen vermuten lassen. Auch diese Beobachtung ist in der Dokumentation von 2013 erwähnt.

Der Vergleich der Objektzustände von 1996, 2013 und 2017 lassen keine gravierenden Zunahmen an Substanzverlust erkennen (vgl. **Abb.161**). Die markierten Bereiche sind im Zeitraum von 1996 bis 2017 – also über 20 Jahre – kaum veränderlich. Der bereits 1996 mit Schalenbildung markierte Bereich zeigt auch noch

2017 dasselbe Schadensphänomen. Es ist also davon auszugehen, dass zwar eine instabile Schadenssituation existiert, diese jedoch einen fortwährenden Bestand hat.
Allerdings ist im Vergleich von 2017 zu 2013 eine starke Zunahme an Schalenbildung in zuvor (2013) als abschuppend markierte Bereiche zu beobachten. Hier scheint also ein fortschreitender Schadensprozess vorzuliegen.
Auch wenn sich ein Objektzustand nicht als direkt Verkehrssicherheit gefährdend darstellt, ist ein restauratorisches Handeln angezeigt und notwendig, um die fortschreitende Schädigung zu minimieren. Bestehende Schäden sollten mittels Fixierung, Anbindung (Schalenhinterfüllung) sowie Rissinjektion stabilisiert und Anböschungen sowie Antragungen zur Regelung der Wasserableitung vorgenommen werden. Eine abschließend aufgebrachte Schlämme in Form einer Schutz- oder Opferschicht vermag in begrenzter Weise die Heterogenität der Oberflächenzustände zu egalisieren. Gleichwohl ist sie als Verschleißschicht gedacht, die in bestimmten Zeitintervallen einer Wartung und Reparatur bedarf. Hier wiederum greift das Verständnis von Wartung und Pflege, das sich im Bericht von 2013 in der deutlich formulierten Anforderung äußert: „Regelmäßige Wartung der Oberflächen in der Zukunft!" (HILBERT & LEHMKUHL, 2013, S. 99)
Von einer hydrophobierenden Maßnahme wird in den seit 2018 erfolgten Bauabschnitten am Schloss Münster vollständig abgesehen, da dem Verständnis nach, diese Maßnahme eine Vielzahl von Schäden hervorgerufen hat. Diese Beobachtung wird durch die im vorliegenden Projekt durchgeführten Untersuchungen untermauert (vgl. Kap. 9.1 und 9.2).

Abb. 161: *Schloss Münster. Ostfassade südlicher Risalit. Linke Seite Objektzustand 1996 (HELLBRÜGGE, 1996); mittig: Objektzustand 2013 Kartierung: Schalenbildung (Orange), Abschuppen (Gelb), Ausbruch Fehlstelle (rot) (HILBERT & LEHMKUHL, 2013); rechte Seite: Objektzustand 2018 Kartierung: Schalenbildung (Blau), Abschuppen (Türkis) (Schmidt, 2020). Die bereits 1996 festgestellte Schalenbildung (rot umrandete Bereiche) bestehen auch 2013 und 2017 – also über 20 Jahre- fort.*

9.4 Modell-Versuch: Ergänzung mit Steinersatzmörtel

Bei tiefergreifenden Schäden an Werksteinen aus Baumberger Kalksandstein erfolgt in Westfalen-Lippe häufig noch immer ein Steinaustausch. Damit verbunden ist der Verlust an originaler Oberfläche mit möglichen Zeugnissen früherer Bearbeitungstechniken. Aber nicht nur Oberflächen, sondern auch Originalsubstanz gehen verloren, denn es werden beim Steinaustausch auch intakte Bereiche des jeweiligen Werksteins entfernt und nicht selten lockert der Ausbau einzelner Steine den Verbund, so dass benachbarte Steine gleich mit erneuert werden müssen. Zudem ist Steinaustausch ein Kostentreiber bei Sanierungsmaßnahmen, denn es ist eine der teuersten Maßnahmen in der Steinrestaurierung – insbesondere aufgrund der Ressource Naturstein, dessen Gewinnung, Transport und Verwendung unter dem Aspekt ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen kritisch betrachtet werden kann.

Ein weiterer Aspekt sind die Folgearbeiten einer durch hauptsächlich Steinaustausch sanierten Fassadenfläche. So werden möglicherweise bei einer ersten anstehenden Sanierung ungefähr ein Drittel der Steine einer Fassade ausgetauscht. Die in der Fassade verbleibenden, historischen Werksteine sind aber bereits auch alt – oft über mehrere 100 Jahre – und entsprechend angegriffen. Folgt man dem eingeschlagenen Weg des Steinaustauschs, so sind diese Werksteine in ca. 20-30 Jahren wiederum soweit verwittert, dass diese dann auch austauscht werden müssen – das könnte das nächste Drittel sein. So kann es passieren, dass innerhalb von ein bis zwei Generationen die komplette Fassadenfläche ausgetauscht wird und keine ursprüngliche Steinoberfläche mit Bearbeitungsspuren und Zeugnissen der Entstehungszeit mehr existiert.

Bei tiefergreifenden Schädigungen gibt es mindestens drei alternative Handlungsoptionen.
Defekte oder desolate Bereiche des jeweiligen Werksteins können abgearbeitet und ausgekastet werden, um dann eine passgenau gearbeitete Vierung aus Naturstein einzusetzen. (vgl. Kap. 7.7.10) Auch hier muss z.T. intaktes Steinmaterial entnommen werden, um die Schadstelle eckig auszukasten.

In Schadbereiche oder bei abgängigen Schalen, die nicht wieder re-appliziert werden können, kann das schadhafte Material entfernt werden. Die Ränder der „neuen" Fehlstelle können angeböscht werden, um die Wasserführung zu regulieren. Auf die neue Fläche erfolgt dann ggfls. der Auftrag einer Schlämme als Schutz- und Opferschicht.
Diese Maßnahme kann mitunter die ursprüngliche Linienführung durch Baugliederung und Fugenverlauf optisch beeinträchtigen, da mit den größtenteils quer im Stein laufenden Anböschungen eine neue Oberflächengliederung entstehen kann. Durch die vielen Oberflächen-Versprünge vergrößert sich insgesamt die Verwitterungsfläche der Fassade und die Schlämme ist als Verschleißschicht gedacht, die in bestimmten Zeitintervallen einer Wartung und absehbar auch der Reparatur bzw. Ausbesserung bedarf.

Eine dritte Variante sind Steinergänzungen mit auf den Naturstein angepassten Steinersatzmassen – also Mörtelergänzungen. Hierzu muss der schadhafte Bereich auf mindestens einen Zentimeter Tiefe und mit steilen Kanten ausgearbeitet werden. Die Steinersatzmasse wird über eine Kontaktschlämme in die Fehlstelle über Niveau aufgetragen und in einem weiteren Arbeitsschritt in Form gebracht sowie der umliegenden Oberflächenstruktur angepasst (vgl. Kap. 7.7.7). Mitunter können Edelstahlarmierungen den besseren und beständigeren Halt der Ergänzung unterstützen.
Die Vorteile dieser Maßnahme liegen auf der Hand: Mörtelergänzungen erzeugen bedeutend sehr viel geringere Sanierungs-/Restaurierungs-Kosten und unterstützen den Erhalt des ursprünglichen Steins, der durch die Mörtelantragung verbessert geschützt ist. So greift zukünftig die Witterung zuerst die Mörtelergänzung anstelle der originalen Steinsubstanz an – die Mörtelergänzung fungiert also auch als eine robuste Verschleiß- oder Opferschicht.

Die Evaluation der langfristigen Wirkung dieser Maßnahme soll anhand der Musterfläche an einem Pfeiler auf Haus Stapel, Havixbeck, in den kommenden Jahren erfolgen. (vgl. Kap. 7.6 und 8.3.4)

9.5 Klimawandeladaption: Präventive Konservierung durch Wintereinhausungen

Da die früheren Hydrophobierungsmaßnahmen irreversibel sind, sie nicht zum Schutz der Objekte beitragen, sondern vielmehr die Schädigung verstärken, werden die Objekte aus dem wenig verwitterungsresistenten Baumberger Kalksandstein weiterhin bei Wasser- und/oder Feuchte-Eintrag zunehmend geschädigt werden. Neuerliche Hydrophobierungen böten ohnehin und insbesondere aufgrund des bereits veränderten Porenraumgefüges keine lang- oder wenigstens mittelfristige Besserung des Erhalts, stattdessen ist eine Verschärfung der Schädigungsprozesse anzunehmen. Das bedeutet, dass Maßnahmen der präventiven Konservierung angezeigt sind: Schutzdächer, Winter-Einhausungen, Überdachungen, u.ä.

Diese Maßnahmen sind vollständig reversibel und können bei Bedarf angepasst werden, was auch in Hinblick auf den Klimawandel und immer höhere Feuchteeinträge bis Extremwettersituationen von entscheidender Bedeutung ist.

Meist werden Wintereinhausungen, die von O bis O – von Oktober bis Ostern – stehen, gewählt. Die kalte Jahreszeit mit einem Schutz der Objekte zu überbrücken, ist insbesondere mit Blick auf die Frostempfindlichkeit von Baumberger Kalksandstein zielführend (vgl. Kap. 5.7). Wölbert (2005) beschreibt die Wirkung von Schutzverkleidung am Portal des Münsters in Schwäbisch Gmünd in den Wintermonaten, in denen, im Vergleich zu den nicht verschalten Bereichen, „die Schutzverkleidung fast durchweg das Absinken der Temperatur auf den Oberflächen unter null Grad verhindert".

Gleichwohl sind beim Bau und Errichten der Einhausungen mehrere Aspekte zu bedenken. Sie müssen nicht nur ästhetischen Ansprüchen gerecht werden, stabil und windfest sein, sollten auch praktikabel sein und vor allem müssen sie den klimatischen Anforderungen von Temperatur und Luftaustausch gerecht werden. Die Schutzverkleidungen können aus Holz, Metall, Stoffbahnen oder Membranen, etc. gebaut sein. (FRANZEN 2018; RUEDERICH et al. 2010)

9.5.1 Objektbeispiel – Telgte

Im Stadtgebiet Telgte, NRW, stehen 46 Bildstöcke, von denen regelmäßig acht seit 1997/2000 von O bis O – von Oktober bis Ostern – eingehaust werden. (mündl. Mittlg. UDB Telgte)

Abb. 162: *Wintereinhausungen von Grabsteinen der sog. Priestergräber, Friedhof Telgte-Ostbevern (KLARA-ID: 118009) (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW)*

Abb. 163 *und* ***Abb. 164:*** *Doppelbildstock, Am Steintor, Telgte (KLARA-!D: 34672): Abb****.: 163*** *Wintereinhausung mit Plexiglasscheibe Abb****.: 163*** *Belüftungsschlitz im oberen Bereich der Einhausung. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW)*

Abb. 165: *Bildstock, Schweinhorst, Telgte (KLARA-!D: 34611): Wintereinhausung mit offenem Belüftungsbereich unten. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW)*

Abb. 166: : *Bildstock, Ostbevener Str./Am Emstor, Telgte (KLARA-ID: 34448): Wintereinhausung mit offenem Belüftungsbereich unten und Kieselbett zwecks Drainage. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW)*

Die Wintereinhausungen in Telgte werden seit über 20 Jahren eingesetzt und unterstützen augenscheinlich den Erhalt der Denkmäler. Die Verkleidungen werden vom Städtischen Bauhof auf- und abgebaut.
In Telgte haben sich Holzverkleidungen bewährt, der ästhetische Anspruch ist der Zweckdienlichkeit hintangestellt. Auf eine gewisse Luftzirkulation wird bei allen Verkleidungen geachtet. Manche haben im unteren Bereich einen freien Raum, so dass Luft strömen kann (vgl. **Abb. 165** und **Abb. 166**b). Mitunter stehen die Bildstöcke in einem Kiesbett, um Staunässe zu vermeiden (vgl. **Abb.162** und **Abb. 166**) Interessant ist die Belüftungslösung beim Doppelbildstock, Am Steintor, Telgte (**vgl. Abb.: 163** und **Abb.: 163**), für die über einen Belüftungsschlitz im oberen Bereich der Einhausung gesorgt wird. Bei dieser Einhausung, die einen gewissen optischen Anspruch verfolgt, ist der Doppelbildstock auf einer Seite durch Plexiglasscheiben sichtbar. Damit einher geht eine mitunter intensive Sonnenbestrahlung (vgl. **Abb.: 163**), die als kritisch zu werten ist.

9.5.2 Jagdschloss Clemenswerth

(Erwin Stadlbauer, NLD, Robert Wennnemer, Birte Graue, LWL-DLBW)

Das Jagdschloss wurde 1737-1747 im Auftrag von Kurfürst Clemens August und unter Leitung des Architekten J. C. Schlaun erbaut. Aus dieser Zeit stammen auch die 8 Steinskulpturen aus Baumberger Kalksandstein, die das Außenmauerwerk des Hauptgebäudes schmücken. Sie sind ca. 1,3 m breit und insgesamt ca. 5 m hoch. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen wurden sie bis Anfang des 19. Jahrhunderts mit geölten Tüchern verhüllt und waren nur zu besonderen Anlässen sichtbar. In der Folgezeit wurde der Schutz vernachlässigt. Die 1945 stark geschädigten Skulpturen wurden 1974-75 umfassend konserviert und restauriert. Weitere Erhaltungsmaßnahmen folgten 1977, 1984 und 1986-88. Grundlegende Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit der bis dahin erfolgten Maßnahmen wurden 1993-96 im Rahmen eines DBU-Förderprojektes durchgeführt. Außerdem wurde ein Schutzkonzept mittels Wintereinhausung der Skulpturen entwickelt, dass der Landkreis Emsland als Eigentümer seitdem realisiert.

In den Jahren 1994-1997 wurde ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes Projekt durchgeführt (STADLBAUER et al., 1998), das zum Ziel hatte, auf Grundlage einer umfangreichen Schadensdetektion – insbesondere vor dem Hintergrund früherer Konservierungen unter Anwendung silizium-organischer Wirkstoffe – einen langfristigen Erhaltungsplan für die Skulpturen des Jagdschlosses zu entwickeln (STADLBAUER et al., 1998, S. 116). In der seit dem 18. Jahrhundert bestehenden Pflegetradition wurden speziell für die Skulpturen des Jagdschlosses Wintereinhausungen konzipiert (WEIß & KALTOFEN, 1998, S. 128ff.) (vgl. **Abb. 167**)

Abb. 167: *Zentralbau von Schloss Clemenswerth mit Wintereinhausungen der Steinskulpturen. (Foto: Michael Herud-Fotolia) (WENNEMER, 2009)*

Im Rahmen des Modellprojektes Naturstein-Monitoring sind 2008-2009 (STADLBAUER 2011 in: AURAS et al. 2011) einzelne Steinskulpturen erneut untersucht worden. Es ging dabei vor allem um mögliche Folgeschäden auf Grund der früheren Konservierung durch mehrfache Kieselsäureester-Festigung und Hydrophobierung. Außerdem wurden Klimamessungen durchgeführt, um neue Erkenntnisse über die Wirksamkeit der Winterschutzhauben zu gewinnen. Darüber hinaus sind im Rahmen der Masterthesis von Robert Wennemer (2009) Musterflächen zur Flechtenentfernung angelegt worden, wie auch zum Schutz dieser gereinigten Flächen, z.B. mit und ohne Lasuren auf Basis von Siliconharz-Emulsion. Die Nachkontrolle erfolgte am 3.8.2022 an der ostexponierten Skulptur Nr. 4 und der westexponierten Skulptur Nr. 5 sowie auch an der südexponierten Skulptur Nr. 6.
Die Master-Thesis befasst sich außerdem mit dem langfristigen Monitoring der Skulpturen des Jagdschlosses unter Berücksichtigung der Wintereinhausungen.

Die Nachkontrolle dieser Musterflächen erfolgte am 03.08.2022 im Rahmen des aktuellen Projekts durch die Gruppe Wennemer, Stadlbauer, Schlütter, Rüße und Graue. Die folgenden Beobachtungen führten zu grundlegenden Erkenntnissen:

1. **Die Wintereinhausung mit Schutzhauben hat sich in Bezug auf die reduzierte Feuchtebelastung und Flechtenbesiedelung bewährt.** Denn an den gereinigten Musterflächen, die in den Sommerhalbjahren seit 2009 der Witterung ohne Schutzbeschichtung ausgesetzt waren, sind keine nennenswerten Veränderungen bzw. Substanzverluste festzustellen. Zudem scheint die Vitalität des Flechtenbewuchses infolge der Einhausung reduziert worden zu sein. Die Wiederbesiedelung der gereinigten Flächen hat im Gegensatz zu früher erfreulicherweise nicht mehr stattgefunden.
An der nordexponierten Skulptur Nr. 2 und der südexponierten Skulptur Nr. 6 wurden im Winterhalbjahr 2008/2009 Klimamessungen durchgeführt sowie auch Oberflächentemperaturen erfasst (Bericht der Fa. Ri-Con vom 4.5.2009). In Südexposition wurde infolge der Sonneneinstrahlung die Lufttemperatur in der Einhausung im Vergleich zu außen 20°C erhöht. Die Oberflächentemperatur der eingehausten Skulptur wurde dadurch bis ca. 10°C erhöht. Dementsprechend sank die relative Luftfeuchte bis auf Werte um 20%. Bei der Nachkontrolle am unteren Teil der Skulptur Nr. 6 wurde (noch) keine Oberflächenveränderung festgestellt, die auf Klimaschwankungen zurückgeführt werden könnte. Gleichwohl muss damit gerechnet werden, dass die Oberflächen der südexponierten Skulpturen auf Grund der Klimaschwankungen mittel- bis langfristig entfestigt werden.

2. **Konservierungsbedingte Folgeschäden, wie z.B. Schuppen- oder Schalenbildung, sind bisher nicht erkennbar.** Die zur Früherkennung prädestinierte Skulptur Nr. 4 mit der schon historisch dokumentierten Schalenbildung im Bereich der Handschuhe ist stabil.
Die allmähliche Wiederzunahme der kapillaren Wasseraufnahme ist messbar und zum Teil werden frühere Schuppenbildungen der Oberflächen wieder aktiv. Ursache ist die nachlassende Wirkung der früheren Konservierungsmaßnahmen einschließlich der dabei durchgeführten Hydrophobierungen. Nachlassende Wirkung ist auch an Klebungen festzustellen, die auf die Konservierung und Restaurierung der 1970-er Jahre zurückgehen. Dementsprechend müssen die erkennbar entfestigten Bereiche möglichst bald nachbehandelt, jedoch nicht erneut hydrophobiert werden.

Die Wintereinhausungen dämmen also die Feuchtebelastung und den biogenen Befall ein, wodurch z.B. die Reinigung der Skulpturen stark reduziert ist. Auch sind seit der regelmäßig alle drei bis fünf Jahre stattfindenden Wartung die Konservierungsmaßnahmen nur in einem sehr geringen Umfang notwendig. Bei der Schutzeinhausung an der südlichen Skulptur, scheint ein Treibhauseffekt aufgrund erhöhter Sonneneinstrahlung zu entstehen, was den biogenen Bewuchs befördern kann. Hier sollte die Schutzeinhausung so verändert werden (z.B. mit höherem Abstand zur Wand montiert), dass eine höhere Luftwechselrate erfolgen kann.

9.6 Innovation: UAV- gestütztes SfM-Monitoring

Ein grundlegendes Element zum langfristigen Erhalt der Objekte aus Baumberger Kalksandstein ist das modulare Monitoring.

Baumberger Kalksandstein ist ein besonderes Denkmalgestein, leider mit einer geringen Verwitterungsresistenz. Die Denkmäler aus Baumberger Kalksandstein werden häufig, z.T. nach relativ kurzen Zeiträumen, wiederholt restauriert.

Um Veränderungen, die mit fortschreitender Zeit zu Schäden werden können, frühzeitig erkennen und Substanzverlust verhindern sowie umfangreiche und teure Restaurierungen oder Sanierungen vermeiden zu können, sollten Denkmäler aus Baumberger Kalksandstein nach individuell festgelegten Zeitintervallen beobachtet und gewartet werden. Der Fokus liegt dabei auf der Beobachtung und Bewertung früherer Maßnahmen und deren langfristige Wirkung, um diese bei Bedarf durch geeignete kleinere Maßnahmen aufrechtzuerhalten.

Bei kleineren meist bildhauerisch bearbeiteten Objekten – wie Bildstöcken, Kreuzwegstationen und Wegekreuzen – ist ein regelmäßiges Monitoring mit relativ geringem Aufwand zu bewerkstelligen. Anders sieht dies bei größeren Objekten aus, vor allem, wenn Bereiche schwer oder nur mit erhöhtem Aufwand wie einen Hubleiterwagen oder ein Gerüst zugänglich sind wie beispielsweise bei der Dachbekrönung der Westfassade am Schloss Münster (vgl. **Abb.168**)

Im Rahmen des Projektes ist hier die Methode des UAV-gestützten SfM-Monitorrings entwickelt worden: ein Monitoring mittels Drohnen-Befliegung zur Dokumentation mit Structure from Motion-Bildserien (vgl. Kap. 8.3.2). Hierbei wird der Aufwand einer Gerüststellung oder eines Hubleiterwagens umgangen, indem der betreffende Bereich mit der Drohne beflogen und mittels Structure from Motion-Technik ein dreidimensionales Abbild angefertigt werden. Dieses dreidimensionale Abbild wird mit dem direkt nach Fertigstellung der Restaurierungsmaßnahme gefertigten 3D-Oberflächenmodels abgeglichen, um Veränderungen im mikroskopischen Bereich erfassen zu können.

Die Erfassung mikrotopographischer Veränderungen an Objektoberflächen durch den rechnerischen Abgleich der Oberflächen als dreidimensionale Polygonnetze, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Monitorings durch fotografische SfM-Technik erzeugt werden, ermöglicht eine rechnergestützte Volumenermittlung der Objektveränderung. Hierbei wird eine Volumenzunahme von einer Volumenabnahme in einer skalierten Falschfarbendarstellung unterschieden, die Dehnungsprozesse – z.B. durch Hohlraumbildung – oder einen Substanzverlust frühzeitig signalisieren.

Insbesondere bei schwer zugänglichen, vornehmlich bildhauerisch bearbeiteten Bereichen stellen das kombinierte Monitoring-Verfahren mittels UAV-gestützter SfM-Dokumentation und der rechnerische Abgleich der Polygonnetz-Oberflächen ein innovatives Verfahren zur Erfassung und dreidimensionaler Quantifizierung mikrotopografischer Veränderungen dar.

Abb. 168: *Westfassade Schloss Münster: eingekreist ist die bildhauerisch bearbeitete und 2022 restaurierte Dachvase. (Foto: M. Ziegert, LWL-DLBW)Zusammenfassung und Ausblick*

Mit dieser innovativen digitalen Monitoring-Methode steht ein hoch-präzises und kosten-effizientes Monitoring-Instrument zur Verfügung, das die Konzeption adäquater Erhaltungsmaßnahmen unterstützt.

9.7 Fazit

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass Objekte aus Baumberger Kalksandstein, die zu früheren Zeiten mit der Intention des Schutzes hydrophobierenden Maßnahmen unterzogen wurden, nunmehr viel stärker verwittern – aufgrund anthropogen bedingter Schwefeloxid-Belastungen im letzten Jahrtausend und heutzutage stärker aufgrund Extrem-Klimaereignissen durch den zunehmenden Klimawandel. Derzeit ist an den Objekten aus Baumberger Kalksandstein ein langsam fortschreitender Zerfall feststellbar, der den Erhalt originaler, historischer Substanz noch in weiten Teilen ermöglicht. Hier müssen objektspezifisch adäquate Erhaltungsstrategien entwickelt werden, zu denen u.a. Steinersatzmassen in Form von Antragungen und Schlämmen als sogenannte Verschleiß-Schichten gehören. Damit diese Beschichtungen an Stelle der originalen Substanz den Witterungs-Einfluss abfangen.

Die hier vorgestellten Beispiele zeigen, dass Monitoring und Wintereinhausungen eine gute Paarung sind, um die Denkmäler aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein in die Zukunft zu bringen. Beides sind Wartungs-Maßnahmen, die in der Regel geringe Kosten aber hohe Effizienz beweisen. Durch die kontinuierlichen Kontrollen in festgelegten Zeitintervallen hat man eine Überprüfung durchgeführter Maßnahmen und kann zügig auf mögliche neu entstandene Schäden mit entsprechend kleineren Maßnahmen reagieren.

Das sind die Zukunftsaufgaben, die mit den jetzt verfügbaren Monitoringverfahren bearbeitet werden können und sollten: Früherkennung von Schäden und Erfassung der Prozess-Dynamik, darauf basierend die Entwicklung kostengünstiger Wartungs- und Pflegekonzepte unter Berücksichtigung der objektspezifischen Erfordernisse.
Diese vorgestellten Maßnahmen ermöglichen den größtmöglichen Erhalt originaler Substanz der Denkmäler, erfüllen den Anspruch der Reversibilität und weisen darüber hinaus eine hohe Einsatz-Flexibilität auf, womit sie einer Klimawandeladaption gerecht werden.

10. Wissensvermittlung und Verbreitung

(Kirsti Krügener, LWL-DLBW)

Die Konservierung und Pflege historischer Bausubstanz ist eine stete Herausforderung, die sowohl fundiertes Fachwissen als auch eine enge Zusammenarbeit verschiedener Akteure im Bereich der Denkmalpflege erfordert. Besonders komplex wird diese Aufgabe, wenn es sich um durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein handelt. Um den Umgang mit diesen speziellen Herausforderungen zu optimieren, bedarf es einer systematischen Vermittlung und Verbreitung von spezialisiertem Wissen und innovativen Methoden. Im vorliegenden Kapitel wird ein umfassender Ansatz vorgestellt, der sich über fünf Ebenen der Wissensvermittlung und -verbreitung erstreckt, um den betroffenen Akteuren – von Denkmalbehörden über Forschungsinstitutionen bis hin zu Objekteignern – wirksame Werkzeuge an die Hand zu geben.
Die erste Ebene konzentriert sich auf die Bereitstellung und den Austausch von Projektinformationen durch die Fachdatenbank KLARA-Delos. Diese Fachanwendung ermöglicht es dem Denkmalamt, Unteren Denkmalbehörden, Forschungsinstituten und Fachleuten im Bereich der Denkmalpflege, relevante Daten und Forschungsergebnisse effizient abzurufen und zu nutzen.
Auf der zweiten Ebene erfolgt die Entwicklung und Bereitstellung der Projektdaten über die Projekt-Website und ermöglicht den Zugang zu den Forschungsergebnissen durch adäquate digitale Präsentation.
Auf der dritten Ebene ermöglicht eine webbasierte Anwendung den Zugang zum digitalen Online-Leitfaden. Dieser Praxisleitfaden soll Untere Denkmalbehörden und Objekteigner als Anwender:innen in die Lage versetzen, durch ein modulares System, das auf den Ergebnissen der jüngsten Forschungen basiert, Schäden zu erkennen, adäquate Maßnahmen zu ergreifen und die Pflege der Objektsubstanz fachgerecht umzusetzen.
Die vierte Ebene baut auf der direkten Vermittlung und Schulung dieses Wissens durch einen theoretischen Vortragsteil und einen praktischen Anwendungsteil als Objektbereisung auf. Diese praktisch orientierten Veranstaltungen dienen dazu, den Teilnehmenden die Anwendung des digitalen Praxisleitfadens vor Ort zu vermitteln. Sie bieten zudem die Möglichkeit, an realen Objekten zu erlernen, welche Untersuchungen und Maßnahmen ergriffen werden und wie der Leitfaden in praktischen Szenarien angewandt werden kann.

Auf der fünften Ebene rückt die Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-gestützte Technik des Structure from Motion (SfM) in den Fokus, die durch kontinuierliche Forschung und den zunehmenden Einsatz in der Praxis, insbesondere bei der LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen (LWL-DLBW), in der Denkmalpflege einen festen Stellenwert als innovatives Monitoringverfahren einnehmen soll. Die Implementierung der UAV-gestützten SfM-Technik als standardisiertes Monitoringverfahren in der Praxis der LWL-DLBW stellt somit einen zukunftsweisenden Schritt in der Denkmalpflege dar. Dieses Verfahren ermöglicht eine bisher unerreichte Genauigkeit in der Erfassung und Bewertung von Zustandsveränderungen an Oberflächen historischer Bauwerke in unzugänglichen Bereichen und bildet eine essenzielle Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Erhaltungsstrategien.

Durch diese fünf Ebenen der Wissensvermittlung und Verbreitung wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, die enge Verzahnung von Theorie und Praxis, sowie die Nutzung modernster Technologien für ein zukunftsorientiertes Fundament für die Denkmalpflege zu schaffen.
In den folgenden Kapiteln werden die Inhalte dieser Ebenen näher beschrieben.

10.1 Implementierung der Projektdaten

Ein Ziel des Projektes war die Verbreitung und Implementierung der Projektdaten in die bestehende Fachdatenbank KLARA-Delos. Die vom Landschaftsverband Westfalen-Lippe seit 1997 aufgesetzte, 2015 mit einem Relaunch adaptierte und stetig optimierte Datenbank KLARA-Delos, dient der effizienten Bewältigung steigender Anforderungen an die Denkmaldokumentation. Sie ist ein zentrales Arbeitsinstrument im Denkmalfachamt, ermöglicht aber auch Städten, Gemeinden, Kreisen, Bezirksregierungen in Westfalen-Lippe und anderen mit dem Denkmalrecht institutionell befassten Körperschaften die Recherche. Mit Einträgen von rund 55.500 Kulturobjekten aus Westfalen-Lippe, darunter etwa 43.000 Baudenkmale bietet KLARA-Delos umfassende Daten, von denen u.a. der Status eines Kulturobjektes, die Adressen und Geometrien, Gutachten und Eintragungsbescheide, aber häufig auch Namen der Architekten, Datierungen, Fotos, Pläne sowie Stellungnahmen und Dokumentationen zu Maßnahmen und Materialien abrufbar sind. KLARA-Delos kann also einerseits für die Denkmalverwaltung genutzt werden, andererseits ist sie aber auch ein wichtiges Hilfsmittel bei der wissenschaftlichen Recherche sowie der Erschließung von Archiv- und Fotobeständen.
Über dieses System, das über die Grenzen der einzelnen Verwaltungsgebiete hinausgeht und ganz Westfalen abdeckt, können sich Sachbearbeiter:innen sowohl aus dem Denkmalamt Westfalen-Lippe als auch aus Unteren Denkmalbehörden und externe Nutzer:innen schnell einen umfassenden Überblick zu relevanten Objekten verschaffen und Datenabfragen für Forschungszwecke tätigen.
Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Datenbank um weitere Identifikationsmerkmale und Klassifizierungen für das Material Baumberger Kalksandstein ergänzt. Zum einen ist eine Zuweisung über die Materialgruppe „Baumberger Kalksandstein" erfolgt, zum anderen können aber auch 107 Objekte und ca. 2.000 neue Datensätze unter dem Aspekt der Untersuchung bzw. Ausweisung zu Althydrophobierungen unter der Gruppe „BKS-Projekt" gefunden werden. Die Internetpräsenz und somit die Weiterleitung zum Schulungsmodul des praxisorientierten Leitfadens und weiteren Projektinformationen und Publikationen ist ebenfalls unter der angelegten Projektseite LWL–Steinkonservierung in der Datenbank hinterlegt.

Abb. 169: *Oberfläche der Datenbank KLARA-Delos, rot eingekreist die Gruppenzuweisung zum BKS-Projekt.*

10.2 Projekt-Website

Die Online-Präsenz (www.lwl-steinkonservierung.de) wird mit Abschluss des Projektes eingerichtet. Sie beinhaltet sämtliche Informationen zum Forschungsprojekt zu untersuchten Objekten und zu den Forschungsergebnissen. Sie stellt die modularen Programme der drei MODULE : ERKENNEN – HANDELN – PFLEGEN vor, bietet dazu spezifische Erläuterungen und weiterführende Hintergrundinformationen zu Untersuchungsmethoden, Maßnahmen im Baukastenprinzip und neuen Monitoring-Verfahren.
Über diese Online-Präsenz erfolgt auch der Zugang zum digitalen, praxisorientierten Leitfaden.

10.3 Modularer Online-Praxisleitfaden

Über die Internetseite der LWL-DLBW oder die Projekt-Website kann der Zugang zum digitalen Praxisleitfaden erfolgen.
Unteren Denkmalbehörden und Objekteignern wird durch Nutzung des modularen Online-Praxisleitfadens die Möglichkeit gegeben, Objektzustände einfacher und vor Ort einzuordnen (MODUL : ERKENNEN) und Handlungsempfehlungen aussprechen oder Einschätzungen zum Umfang von Restaurierungs- und Sanierungsmaßnahmen (MODUL : HANDELN) geben zu können. Zudem werden Monitoring- und Pflegeverfahren für unterschiedliche Objektarten und Materialzustände dargestellt, die dann objektspezifisch für den nachhaltigen konservatorischen Umgang ausgewählt und umgesetzt werden können (MODUL : PFLEGEN). Das bedeutet, dass der digitale Praxisleitfaden zur täglichen Arbeit im Beratungsgeschäft von den Unteren Denkmalbehörden genutzt wird.

Das modulare Programm folgt einer logisch kohärenten Systematik, die sich über drei Schlüsselaspekte erstreckt: Der verursachte Schaden (ERKENNEN) führt zu einer Maßnahme (HANDELN), welche wiederum die Basis für das Monitoring (PFLEGEN) bildet. Das Ziel des Monitorings besteht darin, die Effektivität der durchgeführten Maßnahmen zu überprüfen. Dabei werden die Methoden des Monitorings durch diese Maßnahmen definiert, um so präventiv und konservatorisch vor neuer Schadensbildung handeln zu können.

Abhängig vom Objekt- und Bearbeitungszustand liegen am Baumberger Kalksandstein unterschiedliche Schadensbilder vor, einzeln oder auch im Verbund (vgl. Kap. 6). Das MODUL : ERKENNEN, ein integraler

Bestandteil des Online-Praxisleitfadens, zielt darauf ab, eine einheitliche Erfassung und Standardisierung des modularen Untersuchungsprogramms für durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein zu etablieren.

Die praktische Anwendung des Online-Praxisleitfadens gliedert sich im MODUL : ERKENNEN wie folgt:

1. Verdeutlichung spezifischer Schadensbilder: Anhand von beispielhaften Abbildungen werden die Nutzer mit spezifische Schadensbildern visuell vertraut gemacht. Diese Bilder dienen als Erkennungshilfe und Orientierungspunkt.
2. Zielgerichtete Informationen durch Infoboxen: Für jede identifizierte Schadensart werden begleitende Informationsboxen bereitgestellt, die ein tiefgreifendes Verständnis für die jeweilige Schadenslage fördern. Sie enthalten detaillierte Erläuterungen zum Schadensbild und präsentieren ein passendes Untersuchungsprogramm.
3. Vorschläge zu standardisierten Untersuchungsprogrammen: Nach der Identifizierung eines oder mehrerer Schadensbilder bietet die Navigation des Leitfadens Vorschläge für ein standardisiertes Untersuchungsprogramm an. Diese Programme decken ein Spektrum von grundlegenden bis zu umfassenden Untersuchungen ab, je nach Ausmaß und Art der festgestellten Schäden. Ziel ist es, eine

fundierte Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen und mögliche Restaurierungs- und Sanierungsmaßnahmen zu liefern.
Die Navigation ermöglicht nach der Auswahl der Schadensbilder auch eine Weiterleitung in das MODUL : HANDELN und die Auswahl weiterführender Informationsboxen. Diese konzentrieren sich auf zwei Hauptpunkte:
1. Planung und Umsetzung von Maßnahmen: Der Fokus liegt auf der gezielten Auswahl und Anwendung geeigneter Maßnahmen und Materialien für die identifizierten Schäden, nicht nur zur Behebung aktueller Schäden, sondern auch zur Prävention zukünftiger Beeinträchtigungen. Dabei werden die einzelnen Maßnahmen anhand von bebilderten Informationsboxen nachvollziehbar erläutert.

2. Unterstützung für Beratung: Gleichzeitig bieten die Information zu Maßnahmen Fachberater:innen Hilfestellungen für Ausschreibungen und versorgt Objekteigner mit wichtigen Hinweisen zum Umfang erforderlicher Maßnahmen, basierend auf vorherigen Schadensanalysen und Dokumentation zur Restaurierungsgeschichte. Objekteigner erhalten durch die Informationsboxen im MODUL : HANDELN einen Hinweis auf Umfang und Dringlichkeit der Maßnahmen, die auf den im MODUL : ERKENNEN ausgewählten Schadensbildern basieren. Ziel ist es, allen Beteiligten eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu bieten und die fachgerechte Restaurierung und Sanierung zu unterstützen.

Ausgehend von der Auswahl des Schadensbildes des MODUL : ERKENNEN und der Information der dazugehörigen Maßnahmen des MODUL : HANDELN werden in der Navigation des Online Praxisleitfadens automatisch die Infoboxen zu den Monitoring-Maßnahmen des MODUL : PFLEGEN angezeigt. Hier werden unterschiedliche Maßnahmen- und Schadensspezifische Zuordnung von Monitoring-Methoden gegeben.
Dabei wird für das Monitoring von Objekten aus durch Althydrophobierung vorgeschädigten Baumberger Kalksandstein die Beobachtung und Bewertung früherer Maßnahmen herangezogen, um deren langfristige Wirkung abschätzen bzw. diese durch geeignete kleinere Maßnahmen gewährleisten zu können. Für ein Modulares Monitoring Programm im MODUL : PFLEGEN bedeutet dies, dass die Empfehlung von Monitoring-Maßnahmen drei Aspekte einer logisch konsequenten Systematik folgen:
der Schaden bewirkt die Maßnahme, die Maßnahme bewirkt das Monitoring. So zielt das Monitoring auf die Nachkontrolle der durchgeführten Maßnahmen ab, die letztendlich die Monitoring-Methoden bestimmen.

Im Rahmen des Online-Praxisleitfadens des modularen Monitoring-Programms ist das MODUL : PFLEGEN strategisch darauf ausgerichtet, eine kontinuierliche Pflege und Überwachung von Objekten zu gewährleisten. Die Struktur und Funktionsweise des Moduls basieren auf einer methodischen Vorgehensweise, die in folgenden Schritten zusammengefasst werden kann:

1. Automatische Anzeige von Monitoring-Optionen: Sobald ein Schadensbild ausgewählt und die entsprechenden Maßnahmen festgelegt wurden, zeigt der Online-Praxisleitfaden automatisch zugehörige Infoboxen mit Monitoring-Maßnahmen im MODUL : PFLEGEN an. Diese Infoboxen enthalten maßnahmen- und schadensspezifische Monitoring-Methoden.

2. Logische Systematik des Monitorings: Die Empfehlungen für die Monitoring-Maßnahmen folgen einer klaren, logisch aufgebauten Systematik, die sich in drei Hauptaspekten widerspiegelt:

3.

- **a)** Das Schadensbild führt zur Auswahl spezifischer Maßnahmen.
- **b)** Diese Maßnahmen begründen die Notwendigkeit des Monitorings.
- **c)** Das Monitoring dient der Überprüfung und Nachkontrolle der umgesetzten Maßnahmen und determiniert letztlich die Auswahl der Monitoring-Methoden.

Ein signifikanter Vorteil der Onlineversion dieses praxisorientierten Leitfadens ergibt sich aus der Möglichkeit, ihn kontinuierlich mit den neuesten Erkenntnissen der Restaurierungswissenschaft abzugleichen und zu aktualisieren. Dies schließt die Integration und Anwendung fortschrittlicher Methoden und Maßnahmen sowie Materialien ein, die im Bereich der Denkmalpflege und Objekterhaltung von zentraler Bedeutung sind. Darüber hinaus erlaubt diese digitale Plattform sowohl Objekteignern als auch Unteren Denkmalbehörden, den Leitfaden flexibel und unmittelbar am Standort des jeweiligen Denkmals einzusetzen. Diese Zugänglichkeit verbessert nicht nur die praktische Anwendbarkeit des Leitfadens, sondern fördert auch eine breitere Einbindung und Sensibilisierung für die Notwendigkeit in der fachgerechten Beurteilung und einem verbesserten Verständnis im Umgang mit durch Althydrophobierung geschädigten Baumberger Kalksandstein.

10.4 Schulung zum Praxisleitfaden für Baumberger Kalksandstein

Im Rahmen des Projekts zur Bewahrung und Restaurierung von durch Althydrophobierung geschädigten Objekten aus Baumberger Kalksandstein ist eine Schulungstagung anberaumt, um die digitale Vermittlungsform des Praxisleitfadens vorzustellen und nahezubringen. Diese praxisorientierte Schulung richtet sich gezielt an Mitarbeitende der Unteren Denkmalbehörden, Denkmaleigentümer, Restaurator:innen, Handwerker:innen und alle weiteren Beteiligten.

Zu Beginn der Schulung mit Ausgangspunkt Münster werden sowohl der Praxisleitfaden vorgestellt als auch Einblicke in relevante Projektergebnisse gegeben. Zu den Highlights der Veranstaltung zählt eine Bus-Exkursion zu ausgewählten Objekten, bei denen die praktische Anwendung der verschiedenen Projektmodule – ERKENNEN, HANDELN, PFLEGEN – live demonstriert wird. Ein markantes Beispiel hierfür ist die Musterfläche am Pfeiler des Seitentores von Haus Stapel in Havixbeck. Die Musterfläche dient zur Veranschaulichung der im Leitfaden beschriebenen Methoden.

Am Schloss Münster, dem Endpunkt der Exklusion, werden die kürzlich erfolgten Restaurierungsmaßnahmen inklusive des über weitere Jahre ausgelegten, begleitenden Monitoring-Programms vorgestellt.

Diese Zusammenkunft ermöglicht es den Teilnehmenden, weitreichenden Einblick in die Realisierung der Leitlinien und Techniken zu erhalten und sich über die neuesten Methoden und Ansätze in der Restaurierung und im Umgang mit geschädigtem Baumberger Kalksandstein auszutauschen. Das primäre Ziel dieser Schulung ist es, eine breite Akzeptanz und Anwendung des Praxisleitfadens in der täglichen Arbeit der Unteren Denkmalbehörden, der Objekteigentümer:innen sowie der Restaurator:innen zu fördern. Darüber hinaus wird angestrebt, das Interesse an der Nutzung von Structure from Motion (SfM) als zukunftsträchtige Methode für das Monitoring auszubauen und dessen Akzeptanz zu stärken. Durch den direkten Austausch und die praktische Demonstration wird eine Brücke zwischen Theorie und Praxis geschlagen.

11. Zusammenfassung und Ausblick

(Birte Graue; LWL-DLBW)

Das Projekt ist sowohl in Zielstellung als auch Arbeitsprogramm in die drei MODULE : ERKENNEN – HANDELN – PFLEGEN gegliedert, denen auch der praxisorientierte Leitfaden zum Umgang mit Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein folgt.
Dieser Leitfaden ist ein webbasiertes Online-Tool, das allen Anwender:innen on site – direkt am Objekt – zur Verfügung steht, um eine standardisierte Schadensdetektion durchführen, adäquate Maßnahmen planen und umsetzen sowie ein angepassten Monitoring konzipieren zu können.

11.1 Zusammenfassung

Baumberger Kalksandstein ist ein besonderes Baumaterial aus dem Münsterland, das schon seit vielen Jahrhunderten in zum Teil sehr kleinen Tagebaubrüchen, den Kuhlen, abgebaut und für viele skulpturale Objekte aber auch zum Errichten ganzer Fassaden verwendet wurde. Der Werkstein ist vor allem bruchfrisch detailreich bildhauerisch sehr gut zu bearbeiten. Es sind die Tonminerale, die sogar nach einer erneuten Befeuchtung des Werksteins, ein weicheres Arbeiten ermöglichen.
Und es sind die Tonminerale, aber auch die Mineralkomposition – die zur Bildung des bauschädlichen Salzes Gips durch einwirkende SO_x-Verbindungen führt – die ihm eine geringe Verwitterungsresistenz verleihen. Porenraumparameter und die aufgrund der Genese des Gesteins, geringe Bindung tun ihr Übriges, dass Baumberger Kalksandstein – klassifiziert als „sandsteinartiges Karbonatgestein" (vgl. Kap. 2.1), also im engeren Sinn ein Kalkstein – stark verwittert und mitunter extreme Schalen- und Schuppenbildung zeigt.

Die Untersuchung und Beschreibung des Gesteins in seinen petro-physikalischen Eigenschaften sind ein zentraler Bestandteil des MODUL : ERKENNEN, um das Verwitterungsverhalten verstehen und die Schadensphänomene zuordnen zu können.
Im Rahmen des Projekts wird im MODUL : ERKENNEN zum einen ein umfangreicher Prüfkatalog zur Erfassung der Eigenschaften des bruchfrischen Materials absolviert. Zum anderen werden vergleichende Untersuchungen an mit Hydrophobierungsmitteln behandelten Steinprismen durchgeführt, um das abweichende Verhalten detektieren und mögliche Schädigungsszenarien ermitteln zu können. Diese Beobachtungen wiederum werden mit den Untersuchungen und Tests an den Objekten in situ sowie auch den entnommenen Objektproben abgeglichen.
Die für Baumberger Kalksandstein typischen Verwitterungsformen Schalen- und Schuppenbildung, aber auch Rissbildung und Fehlstellen sind maßgeblich im Zusammenhang mit seinem Wassertransport-verhalten und den Schadsalzen zu sehen. Die Wasserverteilung im Gestein ist mitunter sehr unregelmäßig, so dass es zur Aufkonzentration der Schadsalze an bestimmten Stellen kommt und auch Schichtungen im Steingefüge mit unterschiedlichen Dilatationsverhalten entstehen. Die so entstehenden Spannungen und Scherkräfte können das Lockern und Ablösen von Schichtpaketen – Schuppen oder Schalen – verursachen.
Die durchgeführten Dilatationsmessungen im Labor legen eine Zunahme dieser Spannungszustände aufgrund verändertem Dilatationsverhaltens von nicht behandelten zu mit Hydrophobierungsmitteln behandelten Steinprismen nahe, was eine Verstärkung der Schäden durch Hydrophobierungen bedeutet.

Die Ergebnisse des MODUL : ERKENNEN sind neben dem vertieften Verständnis der petro-physikalischen Eigenschaften von Baumberger Kalksandstein, das Modulare Untersuchungsprogramm (vgl. Kap. 6.8), der Schadenskatalog (vgl. Kap 6.7) sowie das Kartierungsglossar (vgl. Kap 6.9) zur

standardisierten Untersuchung, Erfassung und Dokumentation der Schäden an den Objekten aus dem Gestein, das durch Althydrophobierung vorgeschädigt ist.

Im MODUL : HANDELN werden im Lauf der Projektbearbeitung als erstes die vielen, oft bereits schon mehrfach restaurierten Denkmäler in Hinblick auf die Bewertung der in jüngerer Vergangenheit erfolgten Maßnahmen betrachtet. Hier bewahrheitet sich sehr schnell der avisierte Ansatz des Arbeitens nach Baukastenprinzip – also der Ausführung von ineinandergreifenden und aufeinander folgenden Arbeitsschritten in einem gleichbleibenden Bindemittelsystem der Restaurierungsmaterialien, um die Kompatibilität der Materialien gewährleisten zu können. Die festgestellten Bindemittelsysteme der jüngsten Vergangenheit sind auf Basis von Kieselsäureester (KSE), mineralischem Bindemittel (Kalk/NHL) oder auch Kunstharz-modifizierter Kieselsäuredispersion. Die besondere Herausforderung an Erhaltungsmaßnahmen von mehrfach restaurierten Objekten ist die Wahl eines Bindemittelsystems, das kompatibel zu allen bereits eingebrachten Materialien – und den alternierenden hydrophob/hydrophilen Objektzuständen – ist.
Darüber hinaus wird deutlich, dass bei der Konzeption und Planung von Erhaltungsmaßnahmen eine Unterscheidung zwischen konservatorischen Maßnahmen an feinteilig bildhauerisch bearbeiteten Objekten auf der einen und der Restaurierung von Werksteinbereichen im Mauerwerksverbund auf der anderen Seite zielführend ist. Beispielhaft werden an zwei entsprechenden Objekten die jeweiligen Maßnahmen durchgeführt und dokumentiert.

Die Ergebnisse des MODUL : HANDELN sind der Modulare Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip mit einer Auswahl an Restaurierungsmaterialien und einer Auswahl an Restaurierungsmethoden (vgl. Kap. 7.6).

Wie im MODUL : ERKENNEN festgestellt und verstanden, sind die Objekte aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein umweltbelastet und stark vorgeschädigt. Aus den besten Schutzabsichten der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts, durch Imprägnierungen ein gering verwitterungsresistentes Gestein wetterfest machen zu wollen, ist zu lernen, dass keine aktuelle Restaurierung Objekte aus Baumberger Kalksandstein unverwüstlich werden lassen kann. Das wiederum bedeutet, dass eine Beobachtung und Kontrolle des Zustands des jeweiligen Objekts und der durchgeführten Maßnahme – also ein Monitoring – zielführend ist. Im MODUL : PFLEGEN werden maßnahmenspezifisch verschiedene Monitoring-Methoden für Baumberger Kalksandstein vorgestellt.

Sehr häufig ist Baumberger Kalksandstein für ornamentale Bauzier an großen Bauten verwendet, so dass sich bildhauerisch bearbeitete Bereiche in hohen Höhen oder in schlecht zugänglichen Bereichen befinden können. Hier wurde im Rahmen des Projektes eine innovative Methode entwickelt: eine hochaufgelöste dreidimensionale Erfassung von Objektoberflächen mittels Structure from Motion-Technik unterstützt durch ein unmanned aerial vehicle (umgangssprachlich: Drohne). Hier werden 3D-Polygone errechnet, die im Abgleich mit dem ebenso hergestellten Oberflächen-Modell des darauffolgenden Monitoring-Intervalls abgeglichen und so Volumen-Unterschiede im Millimeter-Bereich festgestellt werden können. (vgl. Kap. 9.6)

Anhand zweier beispielhafter objektbezogener Monitoring-Programme wird als Ergebnis des MODUL : PFLEGEN ein Modulares Monitoring Programm entwickelt (vgl. Kap. 8.4). So wie die Restaurierungs-Maßnahmen durch die zuvor detektierten Schäden festgelegt sind, ist die jeweilige Monitoring-Methode ebenso spezifisch für die Kontrolle der durchgeführten Maßnahme auf ihre langfristige Wirkung.

Die Ergebnisse der einzelnen Module sind jeweils zum Abschluss des Moduls an der Projekt-Musterfläche – einem Pfeiler des nördlichen Seitentores auf Haus Stapel in Havixbeck – umgesetzt und erprobt worden. Diese Musterfläche ist gut zugänglich und wird zukünftig regelmäßig untersucht, um die durchgeführten Maßnahmen – aber auch um das Prinzip ERKENNEN : HANDELN : PFLEGEN als Grundstruktur des Projekts und des Leitfadens zu evaluieren.

11.2 Ausblick

Ausblickend können als besondere Erkenntnisse aus dem Projekt das vertiefte Verständnis für die Schädigung des Baumberger Kalksandsteins und für die damit verbundenen Schadensprozesse mitgenommen werden (vgl. Kap. 9.2). Die in früherer Zeit auf dem Stand der Technik gut intendierten Maßnahmen zu wasserabweisender Imprägnierung und Hydrophobierung zeigen heute eine Verstärkung der Schadensprozesse. Diese Erkenntnis sollte verstehen lassen, dass der Anspruch der Reversibilität einer Maßnahme auch aktuell und zukünftig eine unbedingt zu erfüllende Anforderung ist, die hier möglicherweise davor schützen kann, denselben – oder einen ähnlichen – Fehler zu begehen.

Gleichzeitig bietet das Projekt die Chance, am Beispiel des Schlosses in Münster den Gradienten der Schädigung über einen längeren Zeitraum – hier 21 Jahre – zu bewerten. Dabei zeigt sich, dass bereits 1996 gravierende Schäden aufgetreten und festgestellt wurden, diese jedoch in fast vergleichbarer Form auch 21 Jahre später an denselben Stellen wieder anzutreffen sind. Die Verwitterungsschäden an Baumberger Kalksandstein sind gravierend, der Schadensverlauf scheint aber nicht so stark progressiv zu sein, wie die jeweiligen Schadsituationen vermuten lassen und zu früherer Zeit eingeschätzt wurden.
Für eine Maßnahmen-Planung heißt das, dass die Frage des Steinaustauschs reduziert geplant werden kann. Steinergänzungen durch Mörtelantragungen können stärker in Betracht gezogen und geplant werden, anstelle von Auskasten der Werksteine oder gar Entnahmen ganzer Quader zwecks Steinaustausch (vgl. Kap. 9.4).
Mit Antragungen und Schließen von Fehlstellen mit Steinergänzungsmassen wird sehr viel weniger originale Oberfläche und Substanz zerstört. Die Maßnahme ist bedeutend ressourcenschonender, auch in monetärer Hinsicht – es entstehen sehr viel geringere Sanierungs- oder Restaurierungskosten.
Somit wird bei der späteren Verwitterung nicht die historisch-originale Substanz des Werksteins angegriffen, sondern es verwittert erst einmal die Antragung – quasi als eine Art Verschleißschicht.

Behält man das Ziel Monitoring, Wartung und Pflege sowie die Reversibilität einer Maßnahme im Auge, dann richtet sich der Blick zu Maßnahmen der Präventiven Konservierung. Die Erkenntnis des letzten Jahrhunderts, dass Wasser am besten von den Objekten aus Baumberger Kalksandstein fernzuhalten ist, hat immer noch Gültigkeit. Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit zu erwartend höheren Feuchteeinträgen in unsere Denkmäler verschärft sich die Notwendigkeit adäquaten Schutzes. Schutzeinhausungen stellen hier eine sehr gute Lösung dar. Wie an verschiedenen Objekten festzustellen ist, sind es vor allem die Wintermonate von O bis O – von Oktober bis Ostern – in denen Objekte aus Baumberger Kalksandstein besonders geschützt werden müssen. (vgl. Kap. 9.5)

Die vielen Daten und verschiedenen Projektinhalte und vor allem Projektergebnisse der drei MODULE : ERKENNEN : HANDEL : PFLEGEN werden auf unterschiedliche Weise weitergeben und weiterentwickelt.
Der praxisorientierte Handlungsleitfaden ERKENNEN : HANDEL : PFLEGEN steht allen Interessierten als Web-Anwendung zur Verfügung (vgl. Kap. 10.3). Insbesondere Untere Denkmalbehörden soll der Leitfaden als webbasiertes Online-Tool on site – direkt am Objekt – unterstützen. Hierzu sollen fortgesetzt Schulungen mit einem theoretischen und einem praktischen Teil an den Objekten vor Ort zur Anwendung und Umsetzung des Leitfadens stattfinden. Auch in der Beratung durch die

Denkmalfachämter wird der Leitfaden und vor allem die ihm zugrunde liegende prinzipielle Struktur des ERKENNEN : HANDEL : PFLEGEN Anwendung finden.
Über eine öffentlich zugängliche Projekt-Internetseite (www.lwl-steinkonservierung.de) steht allen Interessierten die Information zum und die Ergebnisse aus dem Projekt zur Verfügung. Vertiefen können die kommunalen Partner, Städte, Gemeinden und auch Forschungsinstitutionen sowie wissenschaftlich Interessierte ihr Wissen über die Datenbank der Fachanwendung KLARA-Delos.

12. Verzeichnisse

12.1 Abbildungsverzeichnis

Die Abbildungen des Deckblattes sind von links nach rechts folgenden Autoren zuzuordnen:
Friederike Funke, Robert Wennemer, Peter Kozub

Abb. 1: Flow Chart: Empfehlung der denkmalpflegerischen Beratung anhand des Leitfaden **Modulares Management: Restaurierung 3.0.** ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abb. 2: Kennzeichnung der Probenorientierung ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abb. 3: Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol". 33
Abb. 4: Detail aus **Abb. 3** Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Oberpaol". 34
Abb. 5: Detail aus **Abb. 3**: Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, ... 34
Abb. 6: Detail aus **Abb. 5** Gefüge des bruchfrischen Baumberger 34
Abb. 7: Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät "Unterpaol". 35
Abb. 8: Details aus **Abb. 7** Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Unterpaol". 35
Abb. 9: Details aus Abb. 7 Gefüge des bruchfrischen Baumberger 35
Abb. 10: Details aus **Abb. 7** Gefüge des bruchfrischen Baumberger 36
Abb. 11: Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Lappen". 36
Abb. 12: Detail aus **Abb. 11** Gefüge des bruchfrischen Baumberger 36
Abb. 13: Detail aus **Abb. 11** Gefüge des bruchfrischen Baumberger Kalksandsteins, Varietät „Lappen". 37
Abb. 14: : REM- Aufnahme Probe 005; tonig-mikritische Matrix: Matrix bestehend aus Calcit-Plättchen und fein verteilten Tonmineralen; turbiditische Ablagerungsbedingungen scheinen bis in die feine Matrix ablesbar. 39
Abb. 15: REM- Aufnahme Proben 001: offenporiges Matrix-Gefüge (Porendurchmesser 15-20 µm) 39
Abb. 16: REM- Aufnahme Probe 001: tonig-mikritische Matrix: Matrix bestehend aus Calcitplättchen und fein verteilten Tonmineralen 39
Abb. 17: REM- Aufnahmen Probe 001: Matrix aus Calcitplättchen, sehr feine Tonminerale (Pfeile) in der gesamten Matrix gleichmäßig verteilt b: Ausschnitt aus a. 40
Abb. 18: REM- Aufnahmen Probe 002; a. Matrixgestütztes Gefüge Matrix b: Element-Mapping: Calcium; c: Element-Mapping: Silizium, d: Tonminerale in der gesamten Matrix gleichmäßig fein verteilt 40
Abb. 19: REM- Aufnahme Probe 008: a. stark zerklüftete, grobkörnigere und rissige Matrix; b. Tonminerale sind fein verteilt und matrixbildend (c); d. Matrix aus Calcit und Tonmineralen 41
Abb. 20: Quader der drei Varietäten des Baumberger Kalksandsteins – Oberpaol (OP), Unterpaol (UP) und Lappen (L). Die Kreise markieren die Stellen, an denen die Bohrkerne für die petrophysikalischen Messungen entnommen worden sind. 45
Abb. 21: Darstellung der Bohrkerne in Bezug auf die Schichtung der Gesteinsquader. Links ist die Ausrichtung parallel zur Schichtung und rechts senkrecht dazu. 46
Abb. 22: Bohrkerne aus den Quadern Oberpaol, Unterpaol und Lappen (links) und jeweils 5 Bohrkernscheiben aus jedem Bohrkern für die Messung der µ-Werte und der biaxialen Biegezugfestigkeit/E-Modul. 47
Abb. 23: Schematische Darstellung der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 15148 am Bohrkern. (Quelle: P. Kozub) 48
Abb. 24: Karstensches Prüfröhrchen mit einem Glockendurchmesser von 45 mm. 50
Abb. 25: Durchfeuchtungskörper bei aufgesetztem Karstenschen Prüfröhrchen idealisierend als Zentralzylinder mit umgebendem Vierteltorus angenommen. (Quelle: P. Kozub) 50
Abb. 26: Präparierte Proben zur Ermittlung des µ-Wertes (wet-cup) im Klimaschrank. 54
Abb. 27: Verteilung der Messpunkte an den Bohrkernen. Links: Ausrichtung senkrecht zur Schichtung; rechts: Ausrichtung des Bohrkerns parallel zur Schichtung 56

Abb. 28: Ausgebaute BKS-Quader vom Haus Stapel. ... 70
Abb. 29: exemplarische Rissbilder nach Versuchsphase III im Vergleich (Fotos: HAWK) ... 85
Abb. 30: Ausschnitt Nordfassade ... 96
Abb. 31: Ausschnitt der Nord-West-Ecke. ... 97
Abb. 32: Detail der Westfassade mit Bänderung aus Baumberger Kalksandstein. ... 97
Abb. 33: Ausschnitt des zweiten Fensters von Westen an der Nordfassade im Hauptgeschoss, mit geschädigtem Fenstergewände. ... 97
Abb. 34: Detail aus Abbildung 4, Schadensbild: Schalenbildung und abschuppende Oberfläche. Bereich Probenentnahme Schale. ... 97
Abb. 35: Lage der Messstellen an der Fassade. ... 104
Abb. 36: Übersicht zu Messstellen 1 bis 5. ... 104
Abb. 37: Messstelle 1-5 ... 104
Abb. 38: Entnommene Proben für Tropfenaufsetzmethode und Gefügeanalyse ... 105
Abb. 39: Aufgefächerte BKS-Schale mit Flechten ... 107
Abb. 40: Aufgefächerte BKS-Schale mit Flechten ... 107
Abb. 41: Details aus **Abb. 39** Flechten: Pilze und Algen ... 107
Abb. 42: Gleiche Probestelle wie Abb. **41** Flechten: Pilze und Algen unter gekreuzten Polarisatoren. ... 108
Abb. 43: Kontaktbereich Flechten/BKS. Zahlreiche Risse. Kein Gips. ... 108
Abb. 44: Gleiche Probenstelle wie Abb. **43** unter gekreuzten Polarisatoren Kontaktbereich Flechten / BKS. Zahlreiche Risse. Kein Gips ... 108
Abb. 45: BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche. ... 109
Abb. 46: Detail aus Abb. **45** BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche. ... 109
Abb. 47: Gleiche Probenstelle wie Abb. **46** unter gekreuzten Polarisatoren BKS-Schale mit Resten einer vergipsten Schlämme an der Oberfläche. ... 109
Abb. 48: Rückansicht ... 110
Abb. 49: Detail der Figur „Maria“ links vom Kreuz, Schadensbild: Fehlstelle im unteren Gewandabschluss ... 111
Abb. 50: Detail der Sockelrückseite, Schadensbild: strukturell stark entfestigter Stein. ... 111
Abb. 51: Detail der Figur „Maria“, links vom Kreuz, Schadensbild: Fehlstelle im Gewand. ... 111
Abb. 52: Ausschnitt der Sockelrückseite mit deutlicher Schalenbildung. ... 112
Abb. 53: Sockelrückseite mit Mürbzone unter Schalen. ... 112
Abb. 54: Detail Sockelrückseite mit Schalenbildung. ... 112
Abb. 55: Entnommene Proben für Tropfenaufsetzmethode und Messung der US-Geschwindigkeit. ... 122
Abb. 56: oben links; Messstellen am Sockel, oben rechts; Messstellen 1-5, unten links; Messstelle 6,8 und 9, unten rechts; Messstellen 10,11,12 und 13. ... 123
Abb. 57: Gefüge des Steins mit Oberfläche zwischen den Bohrkanälen. ... 127
Abb. 58: Detail aus Abb. **57** Oberflächenparallele Risse im Randbereich ... 127
Abb. 59: Detail aus **Abb. 58** Oberflächenparallele Risse an der Kante ... 128
Abb. 60: Intaktes Gefüge des Steins am Ende des Bohrkanals. Übersicht. ... 128
Abb. 61: Detail aus **Abb. 60** Intaktes Gefüge des Steins am Ende ... 128
Abb. 62: Detail aus Abb**. 61** Intaktes Gefüge des Steins am Ende ... 129
Abb. 63: Detail aus Abb**. 62** Intaktes Gefüge des Steins am Ende ... 129
Abb. 64: Kreuzigungsgruppe an der Allee zum Wasserschloss Haus Stapel, Havixbeck. Die rote Umrahmung markiert den Bereich mit dem abgefallenen Gewandstück. ... 131
Abb. 65: Abgefallenes Gewandfragment der Johannes-Figur. Ansicht der Bruchfläche. Die rote Umrahmung markieren die Probenentnahmestellen. Rechts: in Kunstharz eingebettete Proben P1 und P2. ... 132
Abb. 66: Mikroskopische Aufnahmen der Querschliffe der Proben P1 (oben) und P2 (unten). ... 133
Abb. 67: REM- Aufnahmen der Proben P1 (erste und zweite Reihe von oben) und P2 (dritte und vierte Reihe von oben). Oben rechts ein Ausschnitt des Bildes drunter (Probe P1), deutlich sichtbare fossile Überreste. Unten links ein Ausschnitt des Bildes drüber (Probe P2), am Rand der Probe rundliche, geklammerte Struktur einer Foraminifere. ... 134
Abb. 68: REM-Aufnahme der Probe P1. Die gelbe Umrandung markiert den untersuchten Bereich. ... 135
Abb. 69: Ortsaufgelöste Elementanalyse (EDX-Element Mapping) der vorgefundenen Elemente in Probe P1. ... 136
Abb. 70: REM-Aufnahme der Probe P2. Die gelbe Umrandung markiert den untersuchten Bereich. ... 137
Abb. 71: Ortsaufgelöste Elementanalyse (EDX-Element Mapping) der vorgefundenen Elemente der Probe P2. ... 138

Abb. 72: Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Keine Risse 148
Abb. 73: Detail aus **Abb. 72** Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Kein Gips 149
Abb. 74: Gleiche Probenstelle wie **Abb. 73** unter gekreuzten Polarisatoren Gefüge der Schale mit Oberfläche. Aufrauhung (hervorstehende Fossilbruchstücke). Kein Gips 149
Abb. 75: Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen 149
Abb. 76: Detail aus **Abb. 75** Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen 150
Abb. 77: Detail aus **Abb. 75:** Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen 150
Abb. 78: Gleiche Probenstelle wie **Abb. 77**unter gekreuzten Polarisatoren Gefüge der Schale mit oberflächenparallelen Rissen. Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt. 150
Abb. 79: Detail aus **Abb. 78** Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt 151
Abb. 80: Wie **Abb. 79**+ Lambda-Plättchen. Gips im oberflächennahen Gefügeabschnitt.. 151
Abb. 81: Materialproben und Bohrkerne, Haus Stapel, Torhaus und Kreuzigungsgruppe. 151
Abb. 82: Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben) 152
Abb. 83: Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), schräger Randbereich 153
Abb. 84: Detail aus **Abb. 83** Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), schräger Randbereich, Mikrobiologie, kein Gips 153
Abb. 85: Detail aus **Abb. 84** Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), Mikrobiologie, kein Gips 153
Abb. 86: Gleiche Probenstelle wie Abb. **85** unter gekreuzten Polarisatoren Oberflächenparallele Schuppen (Oberfläche im Bild oben), Mikrobiologie, kein Gips 154
Abb. 87: Oberflächenparallele Schuppen. 154
Abb. 88: Weitgehend intaktes Gefüge. Vereinzelt oberflächenparallele Risse 154
Abb. 89: Detail aus **Abb. 88** Weitgehend intaktes BKS-Gefüge mit oberflächenparallelem Riss 155
Abb. 90: Gleiche Probenstelle wie **Abb. 89** unter gekreuzten Polarisatoren. Weitgehend intaktes BKS-Gefüge mit oberflächenparallelem Riss 155
Abb. 91: Schematische Darstellung der 155
Abb. 92: Spiralbohrer (Durchmesser 8 mm) mit markierten Segmenten 157
Abb. 93: verwendetes Bohrwiderstandsmessgerät 172
Abb. 94: Abstandhalter 172
Abb. 95: Probenhalter für Messungen im Labor für Messungen am Objekt 172
Abb. 96: PKD-Bohrschneide an Diaber-Bohrern 173
Abb. 97: ARS-LWL Artificial Reference Stone im Besitz des LWL-DLBW 173
Abb. 98: Gestaltungsspielraum der Bohrwiderstandskurve durch unterschiedliche Nachbearbeitung der Messwerte; grün: unbearbeitete Rohdaten; gelb: gleitender Durchschnitt über 10 Messwerte bei 0,1 mm Schrittweite; blau: gleitender Durchschnitt über 100 Messwerte bei 0,1 mm Schrittweite. Es sind viele weitere Varianten der Nachbearbeitung möglich 174
Abb. 99: oben links; Lage der Bohrkernentnahmestellen und Messstellen an den Fassaden, oben rechts; Lage der Messstellen an der Gebäudeecke, Mitte links; Übersicht Messstellen 1 bis 5, Mitte rechts; Übersicht Messstellen 6 bis 9; Reihe unten von links nach rechts, Messstellen 1+2; 4+3 ;5; 6+9; 8+7. 178
Abb. 100: Herstellung verschiedener siliciumorganischer Hydrophobierungsmittel aus Trichloralkylsilan. Erforderliche Reaktionsschritte zur Bildung eines Silikonharzfilms im Porenraum des Steins. (SNETHLAGE & WENDLER,o.j.). 185
Abb. 101: Vakuumpumpstand. Blick in die Probenkammer. In den Styroporbecher wird ein Kunststoffbehälter mit dem Hydrophobierungsmittel und den BKS-Prismen gestellt. 192
Abb. 102: Vakuumpumpstand. Der Pfeil markiert die Probenklammer. 192
Abb. 103: Lokalisierung der Bohrkerne Lappen ⊥ 194
Abb. 104: Lokalisierung der Bohrkerne Lappen II. 194
Abb. 105: Lokalisierung der Bohrkerne Oberpaol ⊥ 194
Abb. 106: Lokalisierung der Bohrkerne Oberpaol II. 194
Abb. 107: Lokalisierung der Bohrkerne Unterpaol ⊥ 194
Abb. 108: Lokalisierung der Bohrkerne Unterpaol II. 194
Abb. 109: BKS-Steinquader mit Bohrlöchern der entnommenen Proben. 195
Abb. 110: Schematische Darstellung der biaxialen Biegezugfestigkeitsprüfung 200

Abb. 111: Vorrichtung zur Durchführung der biaxialen Biegezugfestigkeit. 202
Abb. 112: Messergebnis UP senkrecht, unbehandelt 202
Abb. 113: Messergebnis UP parallel, unbehandelt 202
Abb. 114: Messergebnis OP senkrecht, unbehandelt 203
Abb. 115: Messergebnis OP parallel, unbehandelt 203
Abb. 116: Messergebnis L senkrecht, unbehandelt 203
Abb. 117: Messergebnis L parallel, unbehandelt 203
Abb. 118: Messergebnis UP senkrecht, KSE 204
Abb. 119: Messergebnis UP parallel, KSE 204
Abb. 120: Messergebnis OP senkrecht, KSE 204
Abb. 121: Messergebnis OP parallel, KSE 204
Abb. 122: Messergebnis L senkrecht, KSE 205
Abb. 123: Messergebnis L parallel, KSE 205
Abb. 124: Eingespannte Probe bei der Ultraschallmessung. 208
Abb. 125: Masse des Steinblocks OP 2.2 und Ausrichtung der Proben (grün II, blau ⊥). 212
Abb. 126: Das Herausbohren der Bohrkerne 212
Abb. 127: Seitentor Nord, Außenansicht, Zwischen Vorburg Nordflügel und Herrenhaus (roter Rahmen). 233
Abb. 128: Westfassade Haus Alst. 254
Abb. 129: Wappensteine, Haus Alst 255
Abb. 130: Vorburg, nördliches Tor, westlicher Pfeiler 275
Abb. 131: Aufnahme nach der Reinigung. Die Schäden sind nun gut sichtbar. 277
Abb. 132: Vorher-Nachher Vergleich während der Entfernung der schwarzen Krusten. gelber Pfeil ungereinigt, blauer Pfeil gereinigt) 278
Abb. 133: Die losen Schuppen und Schalen wurden abgenommen. 278
Abb. 134: Gereinigte Fläche mit Zementergänzungen. 279
Abb. 135: Blick hinter die Zementmörtel. Das Mauerwerk ist nass und stark geschädigt. 279
Abb. 136: Rostige Dübel in den Fugen wurden entfernt. 280
Abb. 137: Nach Entfernung vorhandener Klammer. 280
Abb. 138: Die feuchten Bereiche im Bild zeigen die gefestigten Flächen auf. 281
Abb. 139: Armierung aus Edelstahl für die Haltung einer Mörtelergänzung. 282
Abb. 140: Auftragen einer Mörtelergänzung. 282
Abb. 141: Applikation des Rissinjektionsmörtel 283
Abb. 142: Bruchstück wird angepasst und anschließend geklebt. 283
Abb. 143: Vierungen aus Naturstein wurden nach Maß vorgefertigt und die Sägeflächen überarbeitet. So kann der Mörtel sich besser verkrallen. 284
Abb. 144: Verfüllung der Hohlräume hinter einem Quader mit einem Kalkmörtel. 285
Abb. 145: Südostecke des nördlichen Außenflügels der Vorburg Haus Stapel in Havixbeck. Der dunkelrote Rand markiert den gescannten Bereich. 310
Abb. 146: Falschfarbendarstellung der Unterschiede der untersuchten Oberfläche nach zwei Jahren freier Bewitterung im Intervall von -5 bis +5 Millimetern. Orthogonale Projektion. 311
Abb. 147: Zwei Flächen des Steinquaders (links Westseite, recht Südseite) mit Falschfarbendarstellung der Unterschiede im perspektivische Darstellung. 312
Abb. 148: Schnittlinienselektionsansicht A-A durch das 3D- Modell des Scans vom 03.05.2019 (grüne Linie) und das 3D- Modell des Scans vom 09.07.2021 (rote Linie). An der Stelle des neu entstandenen Schadens ist ein deutlicher Unterschied im Linienverlauf des Nachzustandsmodells im Vergleich zum Vorzustandsmodell zu erkennen (dunkelrote Umrandung). 313
Abb. 149: Münster, Schloss, figuraler Bauschmuck (rote Markierung: dokumentierter Ausschnitt). 315
Abb. 150: Münster, Schloss, ornamentale Maske, Polygonnetz (höchste Qualitätsstufe). 316
Abb. 151: Münster, Schloss, texturiertes 3D-Modell des Nachzustands. 317
Abb. 152: farbcodierte Visualisierung der Oberflächenveränderung des untersuchten Objekts in Artec Studio. ..318
Abb. 153a: Orthomosaik (rektifizierte Darstellung des 3D-Modells) nach der Restaurierung; **9b (rechts)**: Orthomosaik (rektifizierte Darstellung des 3D-Modells) vor der Restaurierung. 318
Abb. 154: Zuordnung der Referenzflächen in den verschiedenen Bereichen der Fassaden 320
Abb. 155: Putto – Schuppen-, Schalen-, Rissbildung (Foto: M.Schmidt) 322

Abb. 156: Mörtelergänzung (Foto: M.Schmidt) 322
Abb. 157: Abschuppen (Foto: M.Schmidt) 323
Abb. 158: Schlämmauftrag (Foto: M.Schmidt) 323
Abb. 159: Schalenbildung (Foto: M.Schmidt) 324
Abb. 160: gesicherte, hinterfüllte und geschlossene Schale (Foto: M.Schmidt) 324
Abb. 161: Schloss Münster. Ostfassade südlicher Risalit. Linke Seite Objektzustand 1996 (HELLBRÜGGE, 1996); mittig: Objektzustand 2013 Kartierung: Schalenbildung (Orange), Abschuppen (Gelb), Ausbruch Fehlstelle (rot) (HILBERT & LEHMKUHL, 2013); rechte Seite: Objektzustand 2018 Kartierung: Schalenbildung (Blau), Abschuppen (Türkis) (Schmidt, 2020). Die bereits 1996 festgestellte Schalenbildung (rot umrandete Bereiche) bestehen auch 2013 und 2017 – also über 20 Jahre- fort. 338
Abb. 162: *Wintereinhausungen von Grabsteinen der sog. Priestergräber, Friedhof Telgte-Ostbevern (KLARA-ID: 118009) (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW)* 340
Abb. 163 und **Abb. 164:** Doppelbildstock, Am Steintor, Telgte (KLARA-!D: 34672): Abb**.: 163** Wintereinhausung mit Plexiglasscheibe Abb**.: 163** Belüftungsschlitz im oberen Bereich der Einhausung. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW) 341
Abb. 165: Bildstock, Schweinhorst, Telgte (KLARA-!D: 34611): Wintereinhausung mit offenem Belüftungsbereich unten. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW) 341
Abb. 166: : Bildstock, Ostbevener Str./Am Emstor, Telgte (KLARA-ID: 34448): Wintereinhausung mit offenem Belüftungsbereich unten und Kieselbett zwecks Drainage. (Foto: M.Rüße, LWL-DLBW) 342
Abb. 167: Zentralbau von Schloss Clemenswerth mit Wintereinhausungen der Steinskulpturen. (Foto: Michael Herud-Fotolia) (WENNEMER, 2009) 343
Abb. 168: Westfassade Schloss Münster: eingekreist ist die bildhauerisch bearbeitete und 2022 restaurierte Dachvase. (Foto: M. Ziegert, LWL-DLBW)Zusammenfassung und Ausblick 346
Abb. 169: Oberfläche der Datenbank KLARA-Delos, rot eingekreist die Gruppenzuweisung zum BKS-Projekt 348

12.2 Diagramverzeichnis

Diagr. 1: Porengrößenverteilung 43
Diagr. 2: Porengrößenverteilung 44
Diagr. 3: Porengrößenverteilung 44
Diagr. 4: Messkurven der 12 untersuchten Bohrkernscheiben im Verlauf der insgesamt 19 Untersuchungstage (27.02.2020-17.03.2020) 59
Diagr. 5: Darstellung der µ-Werte der Einzelmessungen an Bohrkernscheiben der einzelnen Varietäten des Baumberger Kalksandsteins (Oberpaol = OP, Unterpaol = UP, Lappen = L). Berücksichtigt wurde dabei auch die Ausrichtung des Bohrkerns bezüglich der Schichtung des Gesteins (parallel oder senkrecht). Jeder Bohrkern ist mit zwei Einzelmessungen repräsentiert, die im Diagramm direkt nebeneinanderstehen. (Mittelwerte: Unterpaol ⊥ 22,6 ‖ 26,9; Oberpaol ⊥ 20 ‖ 22; Lappen ⊥ 20 ‖ 23,9) 60
Diagr. 6: Gegenüberstellung der Kennwerte der biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls unter Berücksichtigung der verschiedenen Varietäten und auf der möglichen Ausrichtung der Proben parallel (grün) und senkrecht (gelb) zur Schichtung. 61
Diagr. 7: Darstellung der Mittelwerte der Ultraschallmessungen an den verschiedenen Varietäten Oberpaol (OP), Unterpaol (UP) und Lappen (L) unter Angabe der Ausrichtung der Bohrkerne bezogen auf die Schichtung des Gesteins (parallel = par und senkrecht = senk). Zwei zusammenstehende Balken repräsentieren die Messungen an einem Bohrkern, die in zwei Richtungen ausgeführt wurden. 63
Diagr. 8: Porengrößenverteilung (Porendurchmesser) der Varietät Oberpaol. 67
Diagr. 9: Flächenbezogene Wasseraufnahme des Oberpaol senkrecht zur Schichtung. 68
Diagr. 10: Flächenbezogene Wasseraufnahme des Unterpaol parallel zur Schichtung. 68
Diagr. 11: Flächenbezogene Wasseraufnahme des Unterpaol senkrecht zur Schichtung 69
Diagr. 12: Flächenbezogene Wasseraufnahme des Lappen parallel zur Schichtung. 69
Diagr. 13: Flächenbezogene Wasseraufnahme des Lappen senkrecht zur Schichtung 70
Diagr. 14: Vergleich der prozentualen 4-Tage-Wasserabgabe der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen (jeweils 3 Proben, Messwerte in Tagesschritten). 72
Diagr. 15: Vergleich der prozentualen 55-Tage-Wasserabgabe der Varietäten Oberpaol, Unterpaol und Lappen (jeweils 3 Proben, Messwerte in Tagesschritten) 72
Diagr. 16: Hydrische Dilatation der Varietät „Unterpaol" 75
Diagr. 17: Hydrische Dilatation der Varietät „Oberpaol" 75
Diagr. 18: Hydrische Dilatation der Varietät „Lappen" 76
Diagr. 19: Thermische Dilatation der Varietät „Lappen" 77
Diagr. 20: Thermische Dilatation der Varietät „Unterpaol" 77

Diagr. 21: Thermische Dilatation der Varietät „Oberpaol“ 78
Diagr. 22: Veränderung des dynamischer Elastizitätsmoduls im Verlauf des FTW-Versuchs 86
Diagr. 23: Veränderung des Ultraschall E-Moduls parallel und senkrecht zur Schichtung als Funktion der absolvierten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln. 87
Diagr. 24: Bohrwiderstandsprofile der Messungen 1 bis 5 (Bohrschneidenabrieb korrigiert) 104
Diagr. 25: Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 1 bis 5 (Bohrschneidenabrieb korrigiert). 124
Diagr. 26: Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 6 und 9 (Bohrschneidenabrieb korrigiert) 125
Diagr. 27: Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile 10 bis 13 (Bohrschneidenabrieb korrigiert) 126
Diagr. 28: EDX-Spektrum. Die cps (counts per second) der erfassten Elemente im untersuchten Bereich der Probe P1 (s. **Abb. 68** und **Tab. 34**) 135
Diagr. 29: Spektrum 2. Die cps (counts per second) der erfassten Elemente im untersuchten Bereich der Probe P2 (s. **Abb. 70** und **Tab. 35**.) 137
Diagr. 30 : Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 1 durchgeführte Messungen. 156
Diagr. 31: Bohrwiderstandsverläufe für zwei am gezogenen Bohrkern BK 2 durchgeführte Messungen. 156
Diagr. 32: Vergleich verschiedener ARS-Körper: ARS1-LWL bis ARS4-LWL mit weitgehend einheitlichem Bohrwiderstandsniveau, andere ARS-Körper (ARS-HAWK) ARS-WTA) mit abweichender Bohrhärte. 173
Diagr. 33: Charakterisierung der Ausgangsschnitteigenschaften von 5 PKD-Bohrern der LWL-DLBW 174
Diagr. 34: Berechnung einer Korrekturfunktion aus ARS-Kalibriermessungen 175
Diagr. 35: Bohrwiderstandsmessung 1 mit negativen Messwerten, vor und nach Kraftkorrektur. 177
Diagr. 36: Havixbeck, Haus Stapel, Torhaus, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 1 (Bohrschneidenabrieb korrigiert) 179
Diagr. 37: Havixbeck, Haus Stapel, Torhaus, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 2 (Bohrschneidenabrieb korrigiert). 180
Diagr. 38: Havixbeck, Kreuzigungsgruppe, Bohrwiderstandsprofile Bohrkern 3 (Bohrschneidenabrieb korrigiert) 181
Diagr. 39: Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK1 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse) 182
Diagr. 40: Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK2 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse) 182
Diagr. 41: Ultraschallprofil an Bohrkern HS_BK3 (mit zwei verschiedene Skalierungen der Y-Achse) 182
Diagr. 42: Testreihe A1a II. 213
Diagr. 43: Testreihe A1a I⊥ 213
Diagr. 45: Testreihe A1b⊥. 214
Diagr. 44: Testreihe A1bII. 214
Diagr. 46: Testreihe A2a II. 214
Diagr. 47: Testreihe A2a ⊥. 214
Diagr. 48: Testreihe A2b II. 215
Diagr. 49: Testreihe A2b ⊥. 215
Diagr. 50: Testreihe A1b-R II. 218
Diagr. 51: Testreihe A1b-R ⊥ 218
Diagr. 52: Testreihe A2b-R II 218
Diagr. 53: Testreihe A2b-R ⊥. 218
Diagr. 54: Vergleich A1b und A1b-R II. 220
Diagr. 55: Vergleich A1b und A1b-R ⊥. 220
Diagr. 56: Vergleich A2b und A2b-R II. 220
Diagr. 57: Vergleich A2b und A2b-R ⊥. 220
Diagr. 58: Auswertung der Messergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten. 241

12.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mineralbestand und Zusammensetzung des Baumberger Kalksandsteins 14
Tab. 2: Übersicht über die petrophysikalischen Kennwerte des Baumberger Kalksteins 15
Tab. 3: Objektübersicht und Zuweisung zu den Modulen 16
Tab. 4: Probenbezeichnung. 31
Tab. 5: Zusammenfassung der mikroskopischen Gefügeauswertung. 37
Tab. 6: Probenbeschreibung REM 38
Tab. 7: Porositätskennwerte sowie eine Zusammenstellung der relativen Porenvolumina in den einzelnen Porenklassen 43
Tab. 8: Überblick der Ausrichtung der entnommenen Bohrkerne bezogen auf die Schichtung des jeweiligen Gesteinsquaders (bezogen auf die Darstellung **Abb. 21**). 46
Tab. 9: Messwerte der Messungen mit dem Karstenschen Prüfröhrchen an den Varietäten Unterpaol (UP), Oberpaol (OP) und Lappen (L) 56
Tab. 10: Messwerte der Messungen der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN an den Varietäten Unterpaol (UP), Oberpaol (OP) und Lappen (L) 57
Tab. 11: Daten der Rohdichteermittlung an den Varietäten Lappen, Ober- und Unterpaol und die jeweiligen Mittelwerte. 57

Tab. 12: Dokumentation der Mirowskimessung (Lappen, Unterpaol, Oberpaol) mit Wasser und Testbenzin. 58
Tab. 13: Überblick über die Messwerte (Wägung) im Rahmen der Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes (dunklerer Farbton einer Farbe Proben parallel zur Schichtung, hellerer Farbton - senkrecht) (OP - Oberpaol, UP -Unterpaol, L - Lappen) 59
Tab. 14: Biaxiale Biegezugfestigkeiten und statische E-Moduli der untersuchten Bohrkernscheiben (Messungen am 10.03.2020) (grün markierte Proben parallel zur Schichtung, gelb – senkrecht. 61
Tab. 15: Übersicht der ermittelten Ultraschallwerte (Messung am 08.03.2020) (grün markierte Proben parallel zur Schichtung, gelb - senkrecht) 62
Tab. 16: Druckfestigkeiten unter Berücksichtigung der Schichtung aller Varietäten. 65
Tab. 17: Rohdichte, freie kapillare Wasseraufnahme und offene Porosität 66
Tab. 18: Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Werte) 66
Tab. 19: Materialkennwerte der Quader vom Haus Stapel. 71
Tab. 20: Materialkennwerte der Steinbruchproben. 71
Tab. 21: Sorptive Wasseraufnahme bei 30, 65 und 90% relativer Luftfeuchte und 20°C. 73
Tab. 22: Wasserdampfdiffusionswiderstand (µ-Werte und sd-Werte) 74
Tab. 23: Ergebnisse - Thermische Dehnung 78
Tab. 24: Übersicht zu den FTW-Beanspruchungen der BKS-Kollektive 81
Tab. 25: Massebezogene Wasseraufnahmegrade der BKS-Kollektive 85
Tab. 26: Übersicht der im MODUL : ERKENNEN untersuchten Objekte. 88
Tab. 27: Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen. 102
Tab. 28: Übersicht über die entnommenen Materialproben. 105
Tab. 29: Bewertung des Tropfenaufsetzmethode 106
Tab. 30: Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Nordfassade Haus Alst. 106
Tab. 31: Übersicht über die entnommenen Materialproben. 122
Tab. 32: Bewertung des Tropfenaufsetztmethode 122
Tab. 33: Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Kreuzigungsgruppe Havixbeck 127
Tab. 34: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus dem markierten Bereich der Probe P1 (s. **Abb. 68**) 135
Tab. 35: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus dem markierten Bereich der Probe P2 (s. **Abb. 70**) 137
Tab. 36: „Vergleich der chemischen Anteile an bestimmten Molekülen (Oxiden) [...][von Baumberger Kalksandstein (Allgemein)]. Aufgeführt sind nur die für einen Vergleich interessant erscheinenden Elemente". Werte in M. %. 139
Tab. 37: Tropfenaufsetzmethode an Objektproben von Haus Stapel. 143
Tab. 38: Tropfenaufsetzmethode an Objektproben von Haus Stapel Torhaus und Dachvase des Schloss Münster 144
Tab. 39: Tropfenaufsatztest an Objektproben von Schloss Münster, Schloss Ahaus und dem Bildstock Marienlinde. 145
Tab. 40: Tropfenaufsatztest an Objektproben des Löwenportals von Schloss Ahaus 146
Tab. 41: Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Schloss Münster 148
Tab. 42: Übersicht über die Ergebnisse zur mikroskopischen Gefügeanalyse Haus Stapel, Torhaus 152
Tab. 43: Probenbezeichnungen, Beschreibungen, Aufgabenstellungen und Untersuchungsmethoden 158
Tab.44: Übersicht der Prüfreihe nach zweifacher Tränkung an Baumberger Kalksandstein mit Funcosil SNL 190
Tab.45: Übersicht der Prüfreihe nach zweifacher Tränkung an Baumberger Kalksandstein mit KSE H 191
Tab.46: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der Rohdichte. 196
Tab. 47: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der massebezogen Wasseraufnahme. 197
Tab. 48: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der volumenbezogen Wasseraufnahme bzw. offenen Porosität 198
Tab. 49: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des Wasseraufnahmekoeffizients (w-Wert) 199
Tab. 50: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der biaxialen Biegezugfestigkeit. 201
Tab. 51: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des statischen E-Moduls. 207
Tab. 52: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen der Ultraschalllaufgeschwindigkeit. 209
Tab. 53: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen des dynamischen E-Moduls. 210
Tab. 54: Zusammenfassung der Ergebnisse. 215
Tab. 55: Zusammenfassung der Ergebnisse der Testreihen A1b-R und A2b-R (Proben nach der Hydrophobierung). 219
Tab. 56 : Vergleich der Ergebnisse der Testreihen A1b/A2b (unbehandelte Proben) und A1b-R/A2b-R (Proben nach der Hydrophobierung). 220
Tab. 57: Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen, Messpunkt M1, Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Ostseite. 240
Tab. 58: Messungen Karsten´sches Prüfröhrchen, Messpunkt M2, Torpfeiler, westlicher Pfeiler, Ostseite. 240
Tab. 59: Probenbezeichnungen, Beschreibungen, Aufgabenstellungen und Untersuchungsmethoden 242
Tab. 60: 13 ausgewählte Objekte, an denen Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. 246
Tab. 61: Neun beispielhafte Objekte mit Bestands- und Zustandsanalyse 247
Tab. 62: Zuordnung verwendeter Bindemittelsysteme früherer Maßnahmen 248
Tab. 63: Objektbeispiele zur Evaluierung der früheren Maßnahmen 248
Tab. 64: Bewertungsmatrix 249
Tab. 65: Gewichtung der einzelnen Kategorien 250
Tab. 66: Index zur Bewertung der langfristigen Wirksamkeit der letzten Maßnahme 250

Tab. 67: Konservierungskonzept für bildhauerisch bearbeitete Objekte 255
Tab. 68: Materialliste verwendeter Restaurierungsmaterialien. 274
Tab. 69: Materialste verwendeter Restaurierungsmaterialien. 286
Tab. 70: Modularer Maßnahmen-Katalog nach Baukastenprinzip 301
Tab. 71: Maßnahmen- und Schadensspezifische Zuordnung von Monitoring-Methoden. 305
Tab. 72: Monitoring-Methoden Schloss Münster. 320
Tab. 73: Entwicklung des Monitoring-Programms für die Musterfläche anhand des Leitfadens Modulares Management. 326
Tab. 74: Modulares Monitoring-Programm. 330

13. Literaturverzeichnis

ARNOLD, B. & MEINHARDT, J. 2011: Farbwertmessung mittels VIS-Spektroskopie In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

ARTEC D3 2018: Profi-Lösungen für 3D Scanning. Artec 3D Infobroschüre 2018

AURAS, M. 2011a: Schnelltests und einfache Prüfmethoden. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

AURAS, M. 2011b: Durchführung und Auswertung von Ultraschallmessungen. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

AURAS, M. 2011c: Untersuchung bauschädlicher Salze. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

AURAS, M. et al. 2011: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

BLÖCHL, B. 1993: Physikalische und tonmineralogische Untersuchungen an ausgewählten Naturwerksteinen Norddeutschlands, unv. Diplomarbeit Universität Hannover, 1993

BOMMES, K. 2022: Möglichkeiten der Festigung von Drachenfels Trachyt mit Sebosil S. Untersuchungen unter Laborbedingungen und an den Chorkranzkapellen des Kölner Doms 2022. Unveröff. MA-Thesis, TH Köln, CICS

BRAUN, F. 2021: Zur Ermittlung des Langzeitverhaltens hydrophobierter Natursteinoberflächen unter dem Einfluss der natürlichen Verwitterung, unv. Diss., Technische Universität Dortmund, 2021

DEHIO, G. 2011: Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Nordreihn-Westfalen II, Westfalen. Berlin, München 2011.

D'HAM et al. 2011: D´ham, G., Meinhardt, J., Niemeyer, R.: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten oder Mirowski. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

DIN EN 12371:2010-07: Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes

DIN EN ISO 15148:2016-12: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016)

DIN 52104-1:1982-11 Prüfung von Naturstein: Frost-Tau-Wechsel-Versuch. Verfahren A bis Q

DIN EN 1936:2007-02 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität

FARRAK, H. 1999: Historische Steinkonservierungsmaßnahmen in Sachsen um 1900. Unveröff. Diplomarbeit, FH Potsdam

FRANZEN, C. 2018: Winterschutzeinhausungen von Natursteinskulpturen in national bedeutenden Gartenanlagen, modellhafte Bewahrung von Kulturressourcen und Qualitätssicherung. Abschlussbericht zu AZ 30415, DBU Osnabrück, 2018

GEORGE, W. 2005: Alkoxysilanes and Consolidation of Stone, in: Conservation, The Getty Conservation Institutes, Getty Publication, Los Angeles 2005, S. 57

GOTTWALD, R. 20216: KSE als Festigungsmittel in der Steinkonservierung – Untersuchung an Oberkirchner Sandstein zum Einfluss unterschiedlicher Material- und Umgebungsfeuchten auf den Festigungserfolg. Unpubl. BA Thesis FH Potsdam 2016

GRAUE in Druck: Strategien für die Zukunft: Monitoring, Pflege und Wartung von Denkmälern. In Arbeitsheft VDL-Jahrestagung 2022 Münster

GRAUE, B. 2013: Stone deterioration and replacement of natural building stones at the Cologne Cathedral. A contribution to the preservation of cultural heritage. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen 2013

GRAUE, B. ET AL. 2013: Graue, B., Siegesmund, S., Middendorf, B., Hüttenrauch, F., Klein, D., Oyhantcabal, P., Naumann, T., Simon, K., Licha, T. Untersuchungen und Simulation der anthropogenen umweltinduzierten Verwitterung ausgewählter Naturwerksteine und ihrer Interdependenzen mit historischen und neuzeitlichen Baumaterialien am Dom zu Köln. Abschlussbericht eines DBU-Projektes mit dem Aktenzeichen 28253 im Referat 45. Göttingen. 2013

GRIMM, W.-D. 1990: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine, in: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.), Arbeitshefte (50), München 1990, S. 19

HAINDL, K. et al. 2016: Haindl, K., Schöner, T., Zirkelbach, D. Fitz, C.: Was ist bei Karsten & Co. zu beachten? In: Bautenschutz + Bausanierung 3/2016. Verlag Rudolf Müller, Köln

HELLBRÜGGE, C. 1996: Münster Schloß: Zustandskartierung der Schmuckelemente der Außenfassaden. 1996

HILBERT, G. & LEHMKUHL, T. 2013: Münster, Schloss, Fassade: Untersuchungen an einem Teilabschnitt der Fassaden zum Erhaltungszustand und Schadensbild. Steinfurt/Magdeburg 2013

HIRSCHWALD, J. 1912: Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung für Beamte der Materialprüfungsanstalten und Baubehörden, Steinbruchingenieure, Architekten und Bauingenieure - sowie für Studierende der technischen Hochschulen, 2 Bd., Berlin 1911/1912

KAPLAN, U. 2009: Naturbausteine historischer Bauwerke des Münsterlandes und seiner angrenzenden Gebiete, in: Landschaftsverband Westfalen-Lippe (Hg.), Geologie und Paläontologie in Westfalen (73), Münster 2009, S. 95

KETTELHACK, C. 1988: Mikrofazies des Baumberger Sandsteins und deren Einfluß auf Verwitterungserscheinungen untersucht an der Heilig-Kreuz-Kirche in Münster/Westf., unv. Diplomarbeit Universität Münster, 1988

KETTELHACK, C. 1992: Mikrofazies des Altenberger Steins und des Baumberger Sandsteins sowie ihre Verwitterungserscheinungen dokumentiert an zwei historischen Baudenkmälern in Münster/Westf., Diss. Universität Münster (Kurzfassung), 1992

KIRCHNER, K. & ZALLMANZIG, J. 2011a: Abriebversuch mit Pinsel. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

KIRCHNER, K. & ZALLMANZIG, J. 2011b: Bestimmung des Schälwiderstands. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

KIRSTEN, H. 2008: Herkunft, Eigenschaften und Konservierungsmöglichkeiten von Lettenkeuper- und Schilfsandsteinen an Baudenkmalen in Thüringen. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. 2008

KLOPFER, H 1985: Feuchte. In: Lutz P et al. (ed) Lehrbuch der Bauphysik. Teubner,Stuttgart. pp329-472

KOCH, A. & SIEGESMUND, S. 2001: Gesteinstechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine. Z. dt. Ges. Geowiss. 152:681– 700, 2001

KOZUB, P. 2008: To the Determination of the Younng's Modulus from the Biaxial Flexural Srength. In: Łukaszewicz J.W. / Niemcewicz P. (Hrsg.): 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 15-20 Sept. 2008, Nicolaus Copernicus University Press, Torun, Poland, S. 407-414

KOZUB, P. 2020: Kozub, Peter: Przykłady zastosowania 3D-modeli w konserwacji i restauracji objektów kamiennych. Application of 3D-Models in the Conservation and Restoration of Stone Object. In:

Niemcewicz, Piotr/ Chylińska, Marta (Hg.): International Congress Heritage of Artistic Handicraft: Traditional Methods and Modern Preservation. Toruń: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2020, pp. 89-100 und S. 99, Abb.5.: Beispiel für den Vergleich der Geometrie von virtuellen Modellen. Diana, Adam Ferdinand Tietz (1708-1777), Malberger Sandstein, Malberg

KRAMM-GLADE, S. et al. 2018: Kramm-Glade, S., Eichler, J., Ehling, A: Baumberger Sandstein, in: Ehling, A., Lepper, J. (Hg. 2018): Bausandsteine in Deutschland, Band 3B Nordrhein-Westfalen, S. 274f.

LAMPRECHT, L. 1990: Zur Problematik der Hinterfüllung loser Gesteinschollen und die Entwicklung einer modifizierten Tränkungsmethode am Beispiel der Parkfigur „Allegorie des Sommers" aus Wesel/Obrighofen. Unveröff. Diplomarbeit; Fachhochschule Köln. 1990

MARSCHNER, H. 1985: Die Hydrophobierung von Bausteinen. In: Natursteinkonservierung. Tagungsband zum Int. Koll., München, 21.-22.4.1984, Arbeitsheft 31 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, S. 119-141

MASCHA, E. 2021: Visualisierung von Festigungsmitteln im Porenraum von mineralischen Werkstoffen in der Restaurierung. Diss. Universität für angewandte Kunst Wien - Institut für Konservierung und Restaurierung

MEINHARDT, J. & PFEFFERKORN, S. 2011: Bohrwiderstand-Prüfverfahren. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

MEINHARDT-DEGEN, J. & SNETHLAGE, R. 2002: Alte Pinakothek in Munich and Schillingsfürst Castle - Investigations of the effects of retreatment on consolidated as well as hydrophobed sandstone facades. In: Snethlage, R., Meinhardt-Degen, J. (eds.) Workshop DBU-Project: Evaluation of Protective Measures on Sandstone Buildings, 10.-12. Okt. 2002, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, S. 27-38

MÖLLER, U. et al. 1992: Möller, U., Schuh, H., Wendler, E.: Thermisches und hygrisches Längenänderungsverhalten hydrophobierter Sandsteine. 3. Int. Koll. "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 15.-17.12.1992, Technische Akademie Esslingen, S. 1796-8106

MÜLLER-ROCHHOLZ, J. 1988: Eigenschaften Münsterländer Sandsteine mit und ohne Kieselsäureester (KSE)-Behandlung. Bautenschutz u. Bausanierung, 11: S. 109-112

NÄGELE, E. (Hg.) 1992: Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkerhaltung und Denkmalpflege e.V.

NATONS, U. 2017: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit hydrophober Schichten im Beton mittels NMR. Unpubl. Diss., Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, S. 19

PEWNY, S. et al. 2020: Pewny, S., Kirchner, D., Wange, G.: Untersuchung von Gesteinsproben des Baumberger Kalksandsteins mittels hygrischer und thermischer Dehnung, Berichtsnr.: 2020_31 MG, unveröffentlichter Untersuchungsbericht des Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Forschungsbereich Materialkunde, Arbeitsgruppe 3: Geologie und Mineralogie, vorgelegt am 17.07.2020 dem LWL-DLBW Münster Referat DR

QUARIUS, J. M. 2019: Die Wasseraufnahme von kapillaraktiven Baustoffen im Hinblick auf die Ausbildung des Wasserkörpers in die Tiefe, Bachelorarbeit. FH Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung Stein

ROTH, M. 1988: Siliconate - Siliconharze – Silane – Siloxane, Silicon - Bautenschutzmittel für die Oberflächenimprägnierung von mineralischen Baustoffen. In: Weber, H. (ed.): Fassadenschutz und Bausanierung. S. 369-380

RUEDERICH et al. 2010: Ruedrich, J., Rieffel, Y., Pirskawetz, S., Alpermann, H., Joksch, U., Gengnagel, C., Weise, F., Plagge, R., Zhao, J., Siegemsmund, S.: Development and assessment of protective winter covers for marble statuaries oft he Schlossbrücke, Berlin (Germany). Environ. Earth Sci. Springer, 2010. DOI10.1007/s12665-010-0765-2

SCHMIDT, M. 2020: Stadt Münster Fürstbischöfliches Schloss. Sanierung der Fassaden (Naturstein). Dokumentation Konservierungs- / Restaurierungsmaßnahmen, Bauabschnitt I (Südflügel). Laer 2020

SCHMÖLE, R. 1925: Der Baumberger Sandstein und seine Verwitterung, Diss. Universität Münster, 1925

SCHWARZ, B. 1972: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Stuttgart, 1972

SMELOR, M. et. al. 1995: Palynomorphe und Nannofossilien aus den Baumberger Schichten des westfälischen Oberen Campanium (Oberkreide, NW-Deutschland), in: N. Jb. Geol. Paläont., 197 (2), Stuttgart 1995, S. 201-224 (201)

SNETHLAGE, R. & PFANNER, M. 2020: Leitfaden Steinkonservierung. 5. überarbeitete Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

SNETHLAGE, R. & WENDLER, E. (o.J.): Chemical compounds for conservation of natural stone. Vorlesungsskript LMU Fakultät Geowissenschaften, Naturwerksteine – Ihre Verwitterung und Konservierung und Physikalisch-chemische Grundlagen des Bautenschutzes. München

SNETHLAGE, R. 1984: Steinkonservierung - Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege. Bericht für die Stiftung Volkswagenwerk. Arbeitsheft 22 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 203 S.

SNETHLAGE, R. 2011: Hohlstellendetektion mittels Resonanzfühler. Rolf Snethlage. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

STADLBAUER & MÜNCHAU 2023: Sögel, Clemenswerth: Monitoring der Steinskulpturen am Zentralbau, Empfehlungen zu Wartung und Pflege. Vermerk AZ B1 57721-9304, NLD 16.02.2023

STADLBAUER et al., 1998: Stadlbauer, E., Königfeld, P., Behrens, E., Niemeyer, R., Vonend, D.: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlosses Clemenswerth/Emsland. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 15. 1998

VENNEBÖRGER, A. 1987: Mechanische Eigenschaften von – Baumberger – Bentheimer – Ibbenbürenrener Sandstein. Unveröff. Diplomarbeit an der Fachhochschule Münster, FB Bauingenieurwesen, Münster November 1987

VISSER, H. & MIRWALD, P: Baumberger Kalksandstein – Materialeigenschaften und Schadenspotential. In: Stadlbauer et al. (Hg): Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlosses Clemenswerth/Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen (15), München 1998, S. 26-45

WARSCHEID, T. 2011: Mikrobiologisches Monitoring von Gesteinsoberflächen. In: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage. Fraunhofer IRB: Stuttgart, 2011

WEBER, H. 1994: Hydrophobierung als farblose Beschichtungen. In: Weber, H. et al. (Hsg.): Fassadenschutz und Bausanierung: der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden. Kap., Bd. 40 Kontakt & Studium expert Verl., p. 407

WEDEKIND, W. 2016: Weathering and conservation of monuments constructed from tuff and sandstone in different environmental conditions. Case Studies from Mexico, Germany, Jordan and Cambodia. Dissertation Georg-August University School of Science, Göttingen. 2016

WEDEKIND, W. et al. 2016: Wedekind, W., Van den Kerkhof, A., Gross, C., Siegesmund, S.: Contour scaling at the Angkor Temples: Causes, consequences and conservation. In: Science and Art: A Future for Stone. Hrsg. John Hughes, Torsten Howind

WEIß, G. & KALTOFEN, a. 1998: Wartung, Pflege und flankierende Schutzmaßnahmen. In: Stadlbauer et al. (Hg): Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlosses Clemenswerth/Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen (15), München 1998, S. 128ff

WEISS, G. 1992: Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter, Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe B Allgemeine und Angewandte Geologie, Band 9, S. 48

WENDLER, E. & SATTLER, L. 1988: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Steinkonservierungen mit siliziumorganischen Stoffen.- Bautenschutz & Bausanierung, Sonderausgabe (1989), Bausubstanzerhaltung i. d. Denkmalpflege, 2. Statusseminar BMFT, Dez. 1988, Wuppertal, S. 70-75

WENDLER, E. & SNETHLAGE, R. 1989: Der Wassereindringprüfer nach Karsten-Anwendung und Interpretation der Messwerte. Bautenschutz+ Bausanierung 12.6 (1989): 110–115

WENDLER, E. et al. 1990: Wendler, E., Klemm, D., Snethlage, R.: Consolidation and Hydrophobic treatment of Natural Stone. In: Durability of Building Materials and Components, Proc. 5th Int. Conf., Brighton, 7.-9. Nov. 1990, Baker, J.M., Nixon, P.J., Majumdar, A.J., Davies, H. (eds.), (1991) Chapman and Hall, S. 203-212

WENNEMER, R. 2009: Wennemer, Robert: Monitoring von Steinskulpturen am Beispiel des Jagdschlosses Clemenswerth. Masterthesis HAWK, Hildesheim 2009

WITTMANN, F. & PRIMM, P. 1985 : Mesures de l´effet consolidant d´un produit de traitment de la pierre. In: Vth International Congress on Deterioratiuon and Conservation of Stone, Lausanne, 25-27.09.1985, S. 787-793

WÖLBERT, O. 2005: Winterschutzverkleidungen für witterungsgefährdete Objekte: Anforderungsprofile an den präventiven Schutz. In: *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. 42(2005), S. 185-190.* DOI: 10.11588/ih.2005.0.20617

WTA Merkblatt 3-17-10/D:2010-06: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Schriftenreihe der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.

WTA Merkblatt 3-18-14/D: Monitoring von Bauten und Denkmälern aus Naturstein. Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Fraunhofer IRB-Vlg. 2014

ZEISIG, A. et al. 2002: Zeisig, A., Siegesmund, S., Weiss, T.: Thermal expansion and its control on the durability of marbles. Geol. Soc. Spec. Publ. 205: 64-79

Weiterführende Literatur

BIRKENBEUL I. und WEYER, A. (Hg.): Klimazone Kirche. Präventive Konservierung der Ausstattung. Berlin, 2019. (Klimazone Kirche – Präventive Konservierung der Ausstattung | Hornemann Institut (hawk.de))

HEITE,D. und INGRISCH,, J. 2017: Transparente Schutzhüllen – Konzeptionelle Entwicklung eines Einhausungssystems unter Verwendung von transparenten Membranen mit kontrollierter Belüftung zur optimierten winterlichen Einhausung von außenexponierten Kulturgütern. Fraunhofer IRB Verlag, 2017

Leitfaden Zustandserhebung und Monitoring an Wandmalerei und Architekturoberfläche. Bundesdenkmalamt, Wien 2019 (https://www.bda.gv.at/dam/jcr:8ed38ca4-7336-4861-ab24-2f6a0bff8a41/Leitfaden%20Zustandserhebung%20und%20Monitoring%20an%20Wandmalerei%20und%20Architekturoberfl%C3%A4che.pdf)

RINGBECK, B.: Die Monitoring-Instrumente der Welterbekonvention, in: Deutsche UNESCO-Kommission, Luxemburgische UNESCO-Kommission, Österreichische UNESCO- Kommission, Schweizerische UNESCO-Kommission (Hg.), Welterbe-Manual. Handbuch zur Umsetzung der Welterbekonvention in Deutschland, Luxemburg, Österreich und der Schweiz. Bonn 2009, S. 85-88. (02.0204 Unesco-Umschlag.qxd, page 1 @ Preflight)

VDL-Arbeitsheft: Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandsetzung von Baudenkmalen und ihrer Ausstattung. VDL 2016 (https://www.vdl-denkmalpflege.de/fileadmin/dateien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Arbeitsheft_10_Vorsorge_Pflege_Wartung_WEB.pdf)

WAENTIG, F.: Präventive Konservierung. Ein Leitfaden. Berlin, 2014. (Präventive Konservierung. Ein Leitfaden – ICOM Deutschland e. V. (icom-deutschland.de))

WTA REFERAT 10 - PRÄVENTIVE KONSERVIERUNG (https://www.wta-international.org/de/referate/praeventive-konservierung/)