

Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung des Wassertransportes für die Planung und zum Bautenschutz in historischem Ziegelmauerwerk bei dem Einsatz von Innenraumdämmungen

H.-H. Neumann,⁽²⁾ M. Niermann,⁽¹⁾ M. Steiger⁽¹⁾

Abschlussbericht zu dem DBU-geförderten Vorhaben
Förderkennzeichen: 28751-45

Projektpartner:

- ⁽¹⁾ Universität Hamburg
Fachbereich Chemie
Anorganische und Angewandte Chemie
- ⁽²⁾ Büro Dr. Hans-Herrmann Neumann
Schadensanalytik von Anstrichen,
Mörteln, Putzen und Naturwerkstein
Fritz-Döhling-Weg 7h
22149 Hamburg

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	28751	Referat	45	Fördersumme	119.673,- €
----	--------------	---------	-----------	-------------	--------------------

Antragstitel **Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung des Wassertransportes für die Planung und zum Bautenschutz in historischem Ziegelmauerwerk bei Einsatz von Innenraumdämmungen**

Stichworte kapillare Wasseraufnahme, Trocknungsverhalten, historisches Ziegelmauerwerk

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
3 Jahre	28.09.2011	27.09.2014	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Universität Hamburg Fachbereich Chemie Martin-Luther-King-Platz 6 20146 Hamburg	Tel	040 42838 2895
		Fax	
		Projektleitung PD Dr. Michael Steiger	

	Bearbeiter		
--	------------	--	--

Kooperationspartner Büro Dr. H.-H. Neumann, Schadensanalytik von Anstrichen, Mörteln, Putzen und Naturwerkstein
Fritz-Döhling-Weg 7h, 22149 Hamburg

Stadt Norderney, Am Kurplatz 1, 26548 Norderney

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Aus dem Zwang zur Reduktion der globalen CO₂-Emissionen zur Stabilisierung des Weltklimas ergibt sich auch die Notwendigkeit zur Energieeinsparung durch bessere Wärmedämmung von Gebäuden. Bei vielen unter Denkmalschutz stehenden Gebäuden kommt hierfür nur eine Innenraumdämmung in Betracht, die allerdings eine intakte Außenfläche und Maßnahmen gegen permanente Durchfeuchtung erfordert. Um dies zu überwachen, sind geeignete Messverfahren erforderlich. Im Vorhaben werden deshalb zerstörungsfreie, auch für Ziegelmauerwerk mit hohem Anteil an Fugenoberflächen geeignete Methoden zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme bei Beregnung und des Trocknungsverhaltens entwickelt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme basiert auf einer Modifikation der sog. Wasserdurchlässigkeit-Prüfplatte, durch die es möglich ist, den Staudruck während der Messung konstant zu halten. Das Trocknungsverhalten des Mauerwerks wird mit der sog. Kammermethode als bilanzierende Messung des Wassergehaltes der Luft bei der Durchströmung einer Messkammer bestimmt. Mit der Kammer können prinzipbedingt sowohl die Wasseraufnahme von Mauerwerk als auch die Wasserabgabe bestimmt werden, was das Messverfahren auch für andere Anwendungen interessant macht. Im Rahmen dieses Vorhabens werden beiden Verfahren zu einem Messsystem kombiniert, das am Objekt nach einem geringfügigen Umbau sowohl für die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme als auch des Trocknungsverhaltens eingesetzt werden kann. Beide Messverfahren werden zunächst mit Hilfe von Ziegel-Mörtel-Verbundprüfkörpern im Labor optimiert und getestet. Anschließend erfolgt die praktische Erprobung durch Einbindung der Methode zur Zustandsanalyse im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen an zwei unter Denkmalschutz stehenden Objekten mit Ziegelmauerwerk, das verschiedene Ziegelmateriale mit unterschiedlichen Schadensbildern abdeckt. Hauptobjekt ist die Grundschule auf Norderney, für die im Rahmen einer früheren Zustandsanalyse eine ausgezeichnete Vergleichsdatenbasis vorhanden ist. Beim zweiten Objekt handelt es sich um den Wasserturm in Norderney. Das Materialspektrum reicht damit von recht porösem Ziegel bis zu Hartbrandklinker, bei dem der Feuchttransport nahezu ausschließlich über Fugen bzw. Fugenflanken verläuft.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein integrales Untersuchungskonzept für die Feuchteschutzbeurteilung von Ziegel-Verbundmauerwerk erarbeitet und an zwei Objekten, der Grundschule und dem Wasserturm in Norderney, erprobt. Das Untersuchungskonzept basiert zunächst auf zerstörungsfreien Messungen von Wasseraufnahme und Trocknungsverhalten. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme erprobt und verglichen. Schließlich wurde auf die ursprüngliche runde Form der Prüfplatte nach Franke zurückgegriffen, die unabhängig vom Ziegelformat die Bestimmung der Wasseraufnahme von Verbundmauerwerk, d.h. die Aufnahme über Stoß- und Lagerfugen sowie über Ziegel ermöglicht. Eine runde Form ist vor allem zweckmäßig, um die angestrebte Kombination von Wasseraufnahme- und Trocknungsmessung zu gewährleisten. Ein den gängigen Wassereindringprüfern vergleichbar einfaches Messverfahren für die Prüfung des Trocknungsverhaltens von Verbundmauerwerk stand nicht zur Verfügung und wurde im Rahmen des Vorhabens entwickelt. Bei diesem Verfahren ist die Rückwand der für die kapillare Wasseraufnahme verwendeten Prüfplatte austauschbar und wird durch eine durchströmte, ventilierte Kammer ersetzt, bei der am Kammerzugang und am Kammerausgang Temperatur und Luftfeuchtigkeit kontinuierlich gemessen werden. Bei bekannter Strömungsgeschwindigkeit kann auf diese Weise der Fluss von Wasserdampf in das Mauerwerk oder aus dem Mauerwerk bestimmt werden. Hieraus ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Im Vorhaben wurden auf diese Weise Trocknungsraten nach einer zuvor durchgeführten Messung der kapillaren Wasseraufnahme bei Durchströmung der Kammer mit Umgebungsluft bestimmt. Es steht somit nun ein Messverfahren für die Trocknungsmessung von Mauerwerk in situ zur Verfügung. Im Vergleich zu Wasseraufnahmemessungen mit Wassereindringprüfern ist das Verfahren allerdings deutlich aufwendiger und zeitintensiver, bei entsprechender Fragestellung an einem Objekt kann die Methode aber sehr hilfreich eingesetzt werden. Die für eine feuchtetechnische Beurteilung von Verbundmauerwerk, z.B. vor Anbringung einer Innendämmung, erforderlichen Kenndaten können nicht alleine, das haben die Messungen im Labor eindeutig belegt, durch Labormessungen ermittelt werden, da diese unter idealen Bedingungen durchgeführt werden und wesentliche Einflüsse am Objekt, insbesondere die Bildung von Blattkapillaren und Flankenabrissen im Grenzbereich Ziegel-Fugenmörtel, nicht abbilden. Ein weiterer Schwerpunkt des integralen Untersuchungskonzeptes lag deshalb in ergänzenden Untersuchungen zur Charakterisierung des Verbundmauerwerks. Dabei haben sich Bohrwiderstandsmessungen als minimalinvasive Untersuchungsmethode zur Detektion von Übergängen zwischen Fugen- und Mauerwerk sowie von Lockerzonen und der Charakterisierung des Zustandes der Brennhaut von Ziegeloberflächen als sehr hilfreich und der feuchtetechnischen Bestandsaufnahme dienlich erwiesen. Schließlich wurden wenige, aber auf Grundlage zerstörungsfreier bzw. minimalinvasiver Untersuchungen sorgfältig ausgewählte Sandwich-Bohrkerne für die polarisationsmikroskopische Charakterisierung des Gefüges an Mörtel- sowie Ziegel-Mörtel-Grenzflächen verwendet. Die Detektion von Rissen und Flankenabrissen oder die Untersuchung von Verteilung und Anbindung verschiedener Mörtelschichten ist nur auf diese Weise möglich, ist aber entscheidend, um das feuchtetechnische Verhalten von Verbundmauerwerk zu charakterisieren. Ergänzt wurden diese Untersuchungen noch durch tiefenabhängige Salzanalysen. Das dabei verwendete Probenahmekonzept aus einer Kombination von Bohrmehlnahmen mit relativ grober Auflösung bis in große Tiefen kombiniert mit Feinprofilen hoher Auflösung in der Nähe der Oberflächen hat sich sehr bewährt. Es wurde insbesondere nachgewiesen, dass eine zerstörende Beprobung dieser Art nur dann zu rechtfertigen ist, wenn aus den Proben ein Maximum an Information extrahiert wird. Hierfür ist es unerlässlich, Kationen und Anionen zu analysieren und umfassend und fundiert auszuwerten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Vorhabens, insbesondere auch die kombinierte Methode zur Bestimmung von Wasseraufnahme- und Trocknungsverhalten sowie das integrale Untersuchungskonzept werden noch in Fachpublikationen veröffentlicht.

Fazit

Die prinzipielle Vorgehensweise mit dem Fokus hauptsächlich auf zerstörungsfreien Messungen, gefolgt von den Bohrwiderstandsmessungen (minimalinvasiv) und nur wenigen zerstörenden Bohrkernentnahmen hat sich als in höchstem Maße denkmalgerecht erwiesen. An beiden untersuchten Objekten gelang es, aufbauend auf bereits früher durchgeführten Untersuchungen und Instandsetzungskonzepten die Maßnahmen zu begleiten und die Konzepte weiterzuentwickeln bzw. zu modifizieren. Die entwickelte kombinierte Methode zur Bestimmung von Wasseraufnahme und Trocknungsverhalten am Objekt hat sich prinzipiell bewährt, allerdings ist der Messaufwand bei der Trocknungsmessung nicht unerheblich. Das verwendete Verfahren kann auch für eine Vielzahl weiterer Fragestellungen an Denkmalobjekten sehr sinnvoll eingesetzt werden, z.B. zur Bestimmung der Wechselwirkung von versalztem Mauerwerk mit dem Raumklima .

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	1
2. MESSMETHODEN	4
2.1 Messung der kapillaren Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens von Verbundmauerwerk	4
2.2 Weitere verwendete Messmethoden	20
3. LABORUNTERSUCHUNGEN	23
4. OBJEKTUNTERSUCHUNGEN.....	31
4.1 OBJEKTAUSWAHL	31
4.2 GRUNDSCHULE NORDERNEY	31
4.2.1 Historie	31
4.2.2 Schadensbeschreibung	33
4.2.3 Materialkenndaten	41
4.2.4 Untersuchungen zur Salzbelastung	45
4.2.5 Erstes Instandsetzungskonzept und Maßnahmen im Bauabschnitt 1	71
4.2.6 Wasseraufnahme- und Trocknungsmessungen	79
4.2.7 Bohrhärtewiderstandsmessungen	95
4.2.8 Polarisationsmikroskopische Untersuchungen am Mörtel–Ziegel- Verbund	100
4.2.9 Modifizierung des Instandsetzungskonzeptes	112
4.3 WASSERTURM NORDERNEY	114
4.3.1 Historie	114
4.3.2 Schadensbeschreibung	115
4.3.3 Materialkenndaten	119
4.3.4 Salzbelastung und Feuchteparameter	122
4.3.5 Wasseraufnahme und Trocknungsmessungen	124
4.3.6 Polarisationsmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen am Mörtel–Ziegel-Verbund	126
4.3.7 Instandsetzungskonzept und Durchführung der Maßnahmen	129
4.3.8 Erfolgskontrolle.....	132
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND BEWERTUNG.....	135
6 LITERATURVERZEICHNIS.....	141

1 Einleitung

Neben dem zunehmenden Ersatz fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung durch regenerative Energiequellen kommt auch der Energieeinsparung eine große Bedeutung bei der Reduktion anthropogener CO₂-Emissionen zu. In diesem Sinne sind Wärmedämmmaßnahmen zur Einsparung von Heizenergie von erheblicher Bedeutung. Bei denkmalgeschützten Gebäuden kommen jedoch Außendämmungen nicht Betracht, da die Authentizität des Bauwerks nicht gewahrt bleibt. Mit der Entwicklung kapillaraktiver Innendämmungen zur Marktreife, erscheint es nun prinzipiell möglich zu sein, die Innenseiten von Außenwänden zu dämmen. Somit wäre eine Wärmedämmung auch bei denkmalgeschützten Objekten möglich, ohne ihr Erscheinungsbild zu verändern.

Innendämmungen beeinflussen allerdings stark den Feuchtehaushalt eines Mauerwerkes. Durch die Dämmung wird das Temperaturniveau des Wandquerschnitts gesenkt und es kommt zu einem zusätzlichen Feuchteeintrag. Aufgrund der niedrigen Temperatur erfolgt auch die Trocknung langsamer. Vor Anbringung einer Innendämmung ist es deshalb erforderlich, eine Feuchteschutzbeurteilung durchzuführen, um eine Schädigung der Bausubstanz auszuschließen. Zu diesem Zweck wird üblicherweise das Feuchtetransportverhalten eines Mauerwerks mithilfe von Computerprogrammen wie Delphin [1] oder Wufi [2] rechnerisch simuliert. Es ist dabei zu prüfen, ob ein zusätzlicher Feuchteeintrag während der Heizperiode in der Trocknungsperiode vollständig wieder an die Umgebung abgegeben werden kann. Ist dies nicht gewährleistet, kommt eine Innendämmung nicht in Betracht. Eine zentrale Bedeutung besitzt dabei auch die Schlagregensicherheit einer Fassade, um eine zusätzliche Feuchtebelastung zu verhindern. Um sicherzustellen, dass nur so viel Wasser aufgenommen wird, wie unter den veränderten Bedingungen mit Innendämmung wieder verdunsten kann, kommen vielfach an das jeweilige Mauerwerk angepasste Hydrophobierungsmittel zum Einsatz. Für die Entscheidung, ob bei einem Mauerwerk eine hydrophobierende Imprägnierung oder gar eine adaptive Hydrophobierung eingesetzt werden kann, zumal die Applikation einer Innendämmung eine intakte Außenhülle voraussetzt, reicht eine rechnerische Simulation allerdings üblicherweise nicht aus. Der Zustand des Mauerwerks muss bekannt sein. Bei den in Norddeutschland besonders häufig anzutreffenden Ziegelmauerwerken kommt dem Zustand des Fugennetzes und seiner Anbindung an die Ziegel eine ganz besondere Bedeutung zu.

Die Beurteilung des Zustandes der Gebäudehülle erfolgt vielfach visuell durch Inaugenscheinnahme des Fugennetzes, Bestimmung von Rissbreiten und einer Überprüfung der Wasseraufnahme. Je nach Erfordernis sind weitere Untersuchungen durchzuführen, aus denen das Bündel an Instandsetzungsmaßnahmen der Fassade hergeleitet werden kann, die der Vorbereitung einer funktionierenden Innendämmung dienen. Für die Prüfung der Wasseraufnahme wird häufig der Wassereindringprüfer nach Karsten [3,4,5] verwendet. Das komplexe Wasseraufnahmeverhalten eines Verbundmauerwerks mit deutlich unterschiedlichem Saugverhalten von Fugen und Mauersteinen kann mit Wassereindringprüfer nach Karsten (sog. „Karsten-Prüfröhrchen“) allerdings nur unzureichend geprüft werden. Für Messungen an den Ziegelbauwerken in Norddeutschland mit industriell hergestellten Ziegeln hat sich stattdessen die Verwendung der Wasser-

durchlässigkeits-Prüfplatte nach Franke [6] bewährt. Die Saugfläche dieser sogenannten „Franke-Platte“ weist üblicherweise das Format eines Normalziegels sowie eine Lager- und Stoßfuge auf. So dass sich damit die integrale Wasseraufnahme von Ziegel und Mörtel experimentell bestimmen lässt. Für eine weitere Differenzierung, ob die Wasseraufnahme vorwiegend über die Fugenmörteloberfläche bzw. die Grenzfläche Fuge–Ziegel erfolgt oder ob der Ziegel selbst für die Wasseraufnahme maßgeblich ist, sind ergänzende Messungen mit dem Karsten-Prüfröhrchen sinnvoll.

Im Gegensatz zur Wasseraufnahme gibt es für die Messung des Trocknungsverhaltens kein standardisiertes Messverfahren. Deshalb wird die Wasserabgabe meist über den Diffusionswiderstand (μ - bzw. s_d -Wert) beurteilt, der allerdings in Labormessungen mit Vergleichsmaterial bestimmt werden muss. Für eine direkte Messung im Mauerwerksverbund steht derzeit kein einfaches Messverfahren zur Verfügung. Mit dem Diffusionswiderstand ist die für die Trocknungsgeschwindigkeit wichtige erste Trocknungsphase nicht beschrieben, so dass zusätzlich Laborversuche erforderlich sind, die ebenfalls mit Vergleichsmaterial oder mit Ausbaumaterial durchgeführt werden. Es ist praktisch nicht möglich, bei solchen Messungen das Trocknungsverhalten des Ziegel–Mörtel-Verbundes experimentell zu untersuchen, da die Bergung entsprechender Probekörper aus Ausbaumaterial kaum möglich ist. Darüber hinaus muss eine Entnahme notwendiger großer Proben an denkmalgeschützten Bauwerken aus denkmalpflegerischer Sicht als sehr fraglich betrachtet werden.

Für nicht denkmalwürdige Objekte reichen die beschriebenen Verfahren sicherlich aus. Bei Denkmälern muss der objektspezifischen Situation, wie dem Zustand der Fassade, den verwendeten Baustoffen sowie dem Einbauort der Baustoffe (z.B. Gesims oder aufgehendes Mauerwerk), Rechnung getragen werden, um geeignete Voraussetzungen für eine Beurteilung zu schaffen, ob eine Innendämmung für das Mauerwerk geeignet ist oder welche Anforderungen an die Fassade im Hinblick auf die Wasseraufnahme und Wasserabgabe zu stellen sind, damit ein solches Dämmsystem ohne Risiko am Denkmal einsetzbar ist. Die notwendigen Anforderungen müssen anschließend mit der denkmalpflegerischen Zielstellung abgeglichen werden, um auf dieser Grundlage zu entscheiden, ob der angestrebte technische Lösungsweg für das Objekt gangbar ist.

Zielsetzung des hier beschriebenen Vorhabens war deshalb die Entwicklung eines Messverfahrens, bei dem die bewährte Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme in Anlehnung an das Karsten-Verfahren und die Franke-Prüfplatte mit einer zerstörungsfreien Methode zur messtechnischen Erfassung des Trocknungsverhaltens kombiniert wird. Mit diesem Verfahren soll die zerstörungsfreie Prüfung des Wasseraufnahme- und Trocknungsverhaltens direkt im Mauerwerksverbund ermöglicht werden. Zur Überprüfung des Verfahrens sollten Messungen an zwei Ziegel-Bauwerken durchgeführt werden, die sich hinsichtlich der Eigenschaften deutlich unterscheiden. Dazu wurde ein Objekt mit einem gut saugenden Ziegelmaterial ausgewählt (Grundschule Norderney), bei einem zweiten Objekt (Wasserturm Norderney) handelte sich um einen hart gebrannten Ziegel mit gänzlich unterschiedlichen Eigenschaften. Bei einem solchen Material ist davon auszugehen, dass Wasseraufnahme und Abgabe im Wesentlichen auf das Fugennetz beschränkt sind. An beiden Objekten sollte das neue Messverfahren als

Teil eines integrierten Untersuchungskonzeptes zur Schadensdiagnose eingesetzt werden. Da sich beide Bauwerke auf der Insel Norderney befinden, war von sehr ähnlichen klimatischen Verhältnissen auszugehen, dass die Unterschiede im Verwitterungsverhalten, den beobachteten Schadbildern und dem Feuchteverhalten vor allem durch die Materialeigenschaften geprägt sind.

In dem vorliegenden Bericht wird zunächst die Entwicklung des neuen Messverfahrens, das auf der sogenannten Kammermethode zur Messung der Schadgasdeposition auf Materialoberflächen basiert [7], vorgestellt (Kap. 1). Anschließend werden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zusammengefasst (Kap. 1). Abschließend erfolgt eine ausführliche Beschreibung der Untersuchungen an den beiden Objekten (Kap. 1).

Auf Basis der Untersuchungen eines der Projektteilnehmer wurden für beide Objekte Instandsetzungskonzepte angefertigt, die durch die zusätzlichen und neuen Untersuchungsansätze modifiziert werden konnten, so dass es nicht nur sinnvoll erscheint, das Konzept an sich, sondern auch die bisher durchgeführten Maßnahmen zu beschreiben, da es sich um einen dynamischen Prozess der integralen Objektanalyse und Umsetzung der Analysenergebnisse handelt.

2 Messmethoden

2.1 Messung der kapillaren Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens von Verbundmauerwerk

2.1.1 Konzeption

Bei Laboruntersuchungen zu den feuchtetechnischen Parametern von Baustoffproben ist es üblich, sowohl die kapillare Wasseraufnahme als auch das Trocknungsverhalten experimentell zu untersuchen. Entsprechende Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme am Objekt gehören ebenfalls zu den Standarduntersuchungen. Es kommt hierfür häufig der Wassereindringprüfer nach Karsten [3–5] oder abgewandelte Methoden zum Einsatz. Zur Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Mauerwerk steht kein Routinemessverfahren zur Verfügung. Im Vorhaben wurde deshalb ein Messverfahren entwickelt, bei dem die bewährte Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme in Anlehnung an das Karsten-Verfahren und die Franke-Prüfplatte mit einer zerstörungsfreien Methode zur messtechnischen Erfassung des Trocknungsverhaltens kombiniert wird. Mit diesem Verfahren soll die zerstörungsfreie Prüfung des Wasseraufnahme- und Trocknungsverhaltens direkt im Mauerwerksverbund ermöglicht werden.

Die Messung des Flusses eines Gases auf eine Baustoffoberfläche und die dortige Abscheidung ist ein wohlbekanntes Messproblem, das bei der Bestimmung der Aufnahme atmosphärischer Schadstoffe durch Baustoffe bereits umfassend untersucht wurde. Die Abscheidung von Schadgasen auf Baustoffoberflächen ist ein irreversibler Prozess, weshalb es eine Reihe unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung von Schadstoffflüssen gibt, die in der Praxis auch eingesetzt werden [8]. Demgegenüber ist die Aufnahme von Wasserdampf ein reversibler Prozess, der durch ein Gleichgewicht, das Sorptionsgleichgewicht, beschrieben werden kann. Ein Wasserdampfstrom kann sowohl in Richtung der Baustoffoberfläche stattfinden (hygroskopische Wasseraufnahme) oder aber in Richtung Atmosphäre (Trocknung). Die Richtung des Prozesses wird durch den Feuchtegehalt des Materials und die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft bestimmt. Ist die relative Luftfeuchtigkeit höher als die der Materialfeuchte entsprechende Gleichgewichtsfeuchtigkeit, so kommt es zur hygroskopischen Feuchteaufnahme und umgekehrt.

Von den verschiedenen zur Messung von Luftschadstoffflüssen eingesetzten Methoden ist eine Technik, die sogenannte Kammermethode [9], auch für die Bestimmung von Wasserdampfströmen gut geeignet. Bei dem Verfahren wird eine durchströmte Messkammer auf der Materialoberfläche befestigt (Abb. 1). Es handelt es sich um eine Massenbilanzmethode, d.h. der Fluss von der oder zur Materialoberfläche kann durch Differenz der Konzentrationen am Eingang und Ausgang der durchströmten Kammer bestimmt werden [10]. Im Falle von Wasserdampf genügt es also, die relative Luftfeuchtigkeit am Kammer-Eingang und -Ausgang zu messen, um den Fluss zu bestimmen. Für die Berechnung müssen die in der Kammer exponierte Oberfläche des Baustoffs und der Volumenstrom durch die Kammer bekannt sein. Weitere Voraussetzung

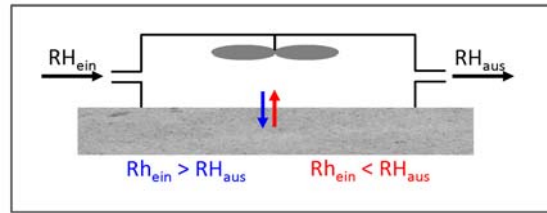


Abb. 1: Prinzip der Kammermethode.

für die Anwendung der Messmethode ist eine ideale Durchmischung der Kammer, die deshalb ventiliert werden muss.

Prinzipiell kann mit dem beschriebenen Versuchsaufbau sowohl die Aufnahme von Wasserdampf als auch die Verdunstung von Wasser aus einem Material experimentell untersucht werden. Für die in diesem Vorhaben vorgesehenen Messungen lag allerdings das besondere Augenmerk auf der Trocknung eines durch kapillare Wasseraufnahme gesättigten Baustoffs, also beispielsweise eines Mauerwerks nach einem Schlagregenereignis. Zu diesem Zweck muss also an einer Messstelle zunächst die kapillare Wasseraufnahme bei Sättigung bestimmt und anschließend an der gleichen Messposition die Trocknung verfolgt werden. Es war deshalb naheliegend die Methode zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauerwerk mit der Kammer zur Bestimmung des Trocknungsverhaltens zu kombinieren. Grundgedanke bei der Entwicklung der Messmethode war also die Verwendung eines kombinierten Messsystems. Dabei erfolgt die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme bei Beregnung in Anlehnung an existierende Messverfahren (Karsten-Prüfröhrchen, Wasserdurchlässigkeitsprüfplatte nach Franke) und wird in einem kombinierten Messsystem realisiert, das nach Umbau auch für die Bestimmung des Trocknungsverhaltens verwendet werden kann.

Beide Messungen können dann an der gleichen Stelle im Mauerwerk durchgeführt werden. Für die Bestimmung des Trocknungsverhaltens wird lediglich die Rückwand der Messkammer ausgetauscht und durch eine Rückwand ersetzt, die es ermöglicht, die Kammer mit Luft definierter Feuchtigkeit zu durchströmen und die Luftfeuchtigkeit am Kammerausgang mit Hilfe eines Sensors zu bestimmen. Die Kammer wird während der Messungen ventiliert, um den Einfluss des diffusiven Transports zu minimieren bzw. über die Drehzahl des verwendeten Ventilators gezielt zu variieren. Bei bekannter Durchströmungsgeschwindigkeit kann aus der Zunahme der Luftfeuchtigkeit am Kammerausgang die Trocknungsrate quantitativ bestimmt werden. Prinzipiell kann die gleiche Kammer natürlich auch ohne vorherige Durchfeuchtung des Mauerwerks verwendet werden, um beispielsweise die hygroskopische Feuchteaufnahme (bei erhöhter Luftfeuchtigkeit) zu bestimmen. Somit stellt die Methode insbesondere bei salzbelastetem Mauerwerk eine interessante und vielfältig einsetzbare Messmethode dar.

2.1.2 Messung der kapillaren Wasseraufnahme

Für die zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme vor Ort wird seit langem der Wassereindringprüfer nach Karsten verwendet. Es handelt sich dabei um eine Glasglocke, mit einem skalierten Einfüllrohr, dessen Öffnung mit einem geeigneten Kitt auf der

senkrechten Wandfläche befestigt wird [11–13]. Da sich das Wasser hierbei im Gegensatz zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten im Labor nicht nur begrenzt über die Messfläche in den Prüfkörper hinein ausbreitet, sondern auch lateral in das Mauerwerk, haben Snethlage [14] sowie Wendler und Snethlage [15] die Messmethodik für Bauwerke aus Naturstein weiterentwickelt und eine Korrekturberechnung eingeführt, die von Hendrickx [16] kürzlich kritisch bewertet und modifiziert wurde. Dies ermöglicht bei ausreichend großem Durchmesser der Glasglocke des Karsten-Röhrchens eine Korrelation mit den im Labor ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten vor und nach einer Hydrophobierung an vom Objekt entnommenen Bohrkernen mit einem Durchmesser von 5 cm. An Musterflächen an Gebäuden oder als Erfolgskontrolle nach Abschluss einer Maßnahme lassen sich so an einem Denkmal zerstörende Probenahmen auf ein Minimum reduzieren. Dementsprechend erfolgt die Messung mit dem Karsten-Röhrchen über festgelegte Zeitintervalle, wobei die Gesamtmessdauer zumeist zwischen 0.5 und 1 Stunde beträgt.

Eine andere Messpraxis besteht für Ziegelmauerwerk, um zu beurteilen, ob eine ausreichende Schlagregensicherheit vorhanden ist. Nach dem ursprünglichen Mess- und Interpretationsansatz von Karsten [3,17] beträgt die Messdauer nur 1 Minute. Bewertungskriterium ist der aus 10 Einzelmessungen gebildete Mittelwert sowie der größte Einzelwert. Die Messung soll erst nach einer Minute beginnen, um einen möglichen Einfluss der Oberflächenbenetzung auf die Messung zu verhindern.

Verwendet werden jeweils handelsübliche Wassereindringprüfer aus Glas mit einem Durchmesser der Glasglocke von ca. 2.6 cm. Daraus würde sich eine Fläche von circa 5.3 cm² ergeben. Demgegenüber geht Karsten von einer Prüffläche von ca. 3 cm² aus, wobei der Dichtstoff am Rand der Glocke eine kreisförmige Fläche mit einem Durchmesser von ca. 2 cm freilassen soll. Je kleiner die Öffnungsweite der Glasglocke ist, desto schwieriger erweist es sich, von Messung zu Messung eine gleichbleibende Öffnungsweite der Prüffläche durch das Anpressen des Röhrchens zu erzielen. Man kann also davon ausgehen, dass der Messfehler bei Wassereindringprüfern mit kleiner Glasglocke erheblich größer ist als bei solchen mit größerer Glasglocke. Das Messverfahren zeigt Abb. 2a und die von Karsten angegebenen Grenzwerte gibt Tab. 1 wieder.

Tab. 1: Grenzwerte für die Beurteilung der Schlagregensicherheit von mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten bestimmten Aufnahmemengen [3,17]. Bei hydrophobiertem Mauerwerk gilt der Grenzwert sowohl für den Stein als auch für die Fuge.

Material	Mittelwert / mL min ⁻¹	größter Einzelwert / mL min ⁻¹
Klinker und Vormauerziegel	≤ 0.5	≤ 2.0
Mörtelfugen	≤ 0.5	≤ 2.0
Hydrophobiertes Mauerwerk	0.0	–

Tab. 2: Aus Reihenversuchungen bestimmte Wasseraufnahmen an Läuferflächen und Fugen mittels Wassereindringprüfer nach Karsten [18,19]. Dabei wurde ein Karsten-Röhrchen mit der gleichen Öffnungsweite verwendet, wie auch Karsten es eingesetzt hat.

Material	Wasseraufnahme / mL (10 min) ⁻¹
Fuge aus Fertigmörtel	2.1–5.6
roter Vormauerstein	2.3–3.0
roter Handstrichziegel	bis 9.2

Tab. 3: Empfohlene Grenzwerte für die mittels Karsten-Röhrchen bestimmte Wasseraufnahme von Mörtelfugen [18,19].

Verblend- mauerwerk	Wassersaug- vermögen	Wasseraufnahme Ziegel / M%	Wassereindringvermögen in Mörtelfugen / mL min ⁻¹	
			Mittelwert	Einzelwert
Klinker	schwach	< 6	≤ 1	≤ 2
Vormauerziegel	mäßig	6–12	≤ 2	≤ 4
Vormauerziegel (handformartig)	stark	> 12	≤ 4	≤ 6

Damit verglichen werden die von Brüning [18,19] vorgeschlagenen Kenn- und Grenzwerte, der die Festlegung eines einheitlichen Grenzwertes für Klinker- und Vormauerziegel im Hinblick auf die Einschätzung einer möglichen Durchfeuchtung von monolithischem Ziegelmauerwerk für nicht sinnvoll hält und nur für Fugen in Abhängigkeit von der Art der verwendeten Ziegel maximale Wassereindringwerte festlegt. Dabei wird zwischen Klinker, industriell und manuell hergestellten Vormauerziegeln differenziert (Tab. 2, Tab. 3). Knöfel et al. lehnen Messungen der Wasseraufnahme mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten auf den Fugen von Ziegelmauerwerk als aussagekräftiges Beurteilungsverfahren für die zuverlässige Beurteilung des kapillaren Saugvermögens von Mauerwerksfugen aufgrund der nachgewiesenen hohen Streubreite grundsätzlich ab [20]. Aufgrund dessen sowie unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die angegebenen Grenzwerte im Wesentlichen auf Erfahrung beruhen und eine experimentelle Basis fehlt, eignet sich diese Art der Messung ausschließlich für orientierende Messungen zur Prüfung ob der Ziegel mehr Wasser aufnimmt als der Mörtel, ob aufgrund vorhandener Risse, insbesondere von Fugenflankenabrissen, mehr Wasser in das Mauerwerk eindringt als über intakt erscheinende Fugen und inwiefern die Applikation einer Hydrophobierung die Wasseraufnahme gänzlich unterbindet [21]. Für viele Anwendungen reicht die orientierende Messung zur Einschätzung aus. Dies ist aber nicht der Fall, wenn eine Hydrophobierung des Mauerwerks als Mittel zur Verringerung der Wasseraufnahme in Betracht gezogen wird, weil z.B. eine kapillarleitende Innendämmung zur

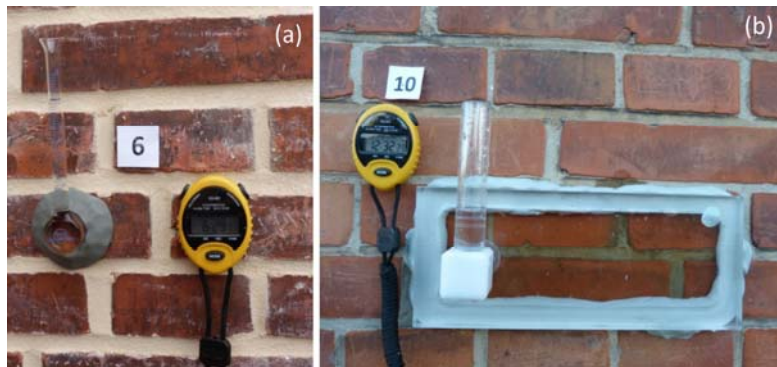


Abb. 2: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme (verschiedene Ausführungen). (a) Wassereindringprüfer nach Karsten; handelsübliches Glasröhrchen der Fa. Mohren mit einem Durchmesser der Messfläche von 2.6 cm. (b) Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke (WA-Prüfplatte) aus Polycarbonat. Die Messfläche umfasst einen Ziegel in Normalformat sowie eine Lage- und Stoßfuge. Die Anbringung erfolgt stets mittig über der Lagerfuge. Bei der handelsüblich erwerblichen WA-Prüfplatte ist das aus zwei rechtwinklig angeordneten Rohren bestehende Einfüllrohr am Gehrungsschnitt verklebt. Dies stellt einen Schwachpunkt dar, an welchem nach kurzer Zeit Wasser austritt oder Bruch erfolgt. Deshalb wurde ein Winkelstück gebaut, in welchem die beiden Rohrstücke mit Dichtungsringen befestigt sind.

Reduzierung des Primärenergiebedarfs eingebaut werden soll, die wiederum zur Absenkung der Temperatur im Wandquerschnitt führt.

Im Labor lässt sich zwar der Wasseraufnahmekoeffizient an Ausbauziegeln eines Bauwerks bestimmen, nicht aber an Ausbauproben des Verbundes, die den Istzustand des untersuchten Mauerwerks repräsentieren. Zum einen lassen sich nur selten am Objekt solche Proben gewinnen, ohne dass sie bei der Entnahme entlang des Fugennetzes auseinanderfallen, zum anderen sollte die zerstörende Probenahme und Untersuchung am denkmalgeschützten Bauwerk auf das notwendige Minimum begrenzt werden.

Die einzige Methode die Wasseraufnahme des Verbundes *in situ* untersuchen zu können, um eine Aussage darüber zu treffen, ob einschaliges Mauerwerk schlagregensicher ist oder mit Durchfeuchtungen gerechnet werden muss, stellt die Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke dar [6]. Die Größe der Messfläche umfasst eine Ziegel im Normalformat sowie eine Lager- und eine Stoßfuge. Die Prüfplatte wird mittig über der Lagerfuge mit einem geeigneten Kitt angebracht (vgl. Abb. 2b).

Diese Entwicklung resultiert aus den vielen fehlgeschlagenen Hydrophobierungen von Ziegelmauerwerk in den 1980er Jahren. In dem Forschungsansatz wurde auch der Zusammenhang zwischen Hydrophobierungsmittelmenge und maximaler überbrückbarer Rissbreite systematisch untersucht, mit dem Ergebnis, dass die maximale Grenzrissbreite zwischen 0.05 und 0.1 mm, je nach Hydrophobierungsmittelmenge liegt. Die Ergebnisse wurden anhand von Prüfwänden mit simulierten Rissen bekannter Breite erzielt, deren Erzeugung durch Einlegen unterschiedlich dicker Folie in die Fuge während des Mauerns geschah, die definiertem Wechselklima aus Regen und Trocknung in einer Klimakammer ausgesetzt waren.

Mit diesen Ergebnissen ließen sich die mit der Wasseraufnahme-Prüfplatte bestimmten Wassermengen für einschaliges Mauerwerk mit einer Dicke von 36 cm kalibrieren. Die

Tab. 4: Grenzwerte zur Beurteilung der Wasseraufnahme von einschaligem Ziegelmauerwerk (Wandstärke von 36 cm) mit der WA-Prüfplatte nach Franke.

Verbrauch / mL (15 min) ⁻¹	Bewertung der Situation
100	schlagregendichtes Mauerwerk
100 - 150	gerade noch akzeptable Aufnahmemenge
>150	nicht mehr schlagregendicht
>300	Durchfeuchtungen zu befürchten
ab 400 – 500	mit hoher Wahrscheinlichkeit Durchfeuchtung
30 – 150	Wasseraufnahme von gut verarbeitetem Mauerwerk aus mitteldichten Vormauerziegeln und Klinker mit Rezeptmörteln
<2.5	erfolgreich hydrophobiertes Mauerwerk

Grenzwerte sind in Tab. 4 zusammengestellt [22]. Dabei wurde auf eine Umrechnung in einen Wasseraufnahmekoeffizienten verzichtet, da im realen Ziegelmauerwerk von keinem eindimensionalem Transport nach innen ausgegangen werden kann, sondern je nach Ausbildung des Kontaktes zwischen Fugen- und Mauermörtel eine starke laterale Transportkomponente (Lagerfugen) hinzukommt, die viel stärker ausgeprägt sein kann als die laterale Wasserausbreitung im Ziegel bei Messung der Wasseraufnahme mittels Wassereindringprüfer nach Karsten und vor allem vom Transportverhalten auch anders zu interpretieren ist. Zumal durch die Risse und/oder Fehlstellen ein Durchströmen des Bauteils gegenüber einem kapillaren Saugen zumeist vorherrscht. Deshalb besteht auch eine Abhängigkeit der Größe der Wasseraufnahme von dem Druck der Wassersäule, welcher durch die Füllhöhe des Röhrchens bestimmt wird, wie es für Regen bei deutlichem Winddruck angenommen werden muss. Eine Füllhöhe von 50 mm bezogen auf die Mitte der Lagerfuge entspricht etwa mittleren bis großen Windstärken.

Neben der Grenzrissbreite existiert bei hydrophobiertem Mauerwerk, eine ausreichende Hydrophobierungsmittelmenge vorausgesetzt, eine Rissbreite, ab der keine Erhöhung der Wasseraufnahme mehr auftritt. Über dieses Rissbreitenintervall hinaus ist die Weiterleitung hinter dem Fugenmörtel und in dem Mauermörtel, durch Fehlstellen und Risse, maßgeblich für die Größe der Wasseraufnahme [6,23–26]. Sowohl der Wassereindringprüfer nach Karsten als auch die Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke, kurz WA-Prüfplatte genannt, wurden weiterentwickelt. Erstgenanntes Prüfverfahren wurde durch eine zweite äußere Glasglocke mit skaliertem Einfüllrohr ergänzt, die vollständig von der inneren Glasglocke getrennt ist und als Wassereindringprüfer nach Pleyers bezeichnet wird (vgl. Abb. 3a) [27,28]. Dadurch kann unmittelbar über die Skalierung des inneren Steigrohres auf den Wasseraufnahmekoeffizienten geschlossen werden.

Auch für Ziegel lässt sich der Wassereindringprüfer nach Pleyers einsetzen. Während für schwach saugende Ziegel kaum Unterschiede zwischen der mit dem Karsten- und dem Pleyers-Röhrchen aufgenommenen Wassermenge bestehen, wird der Unterschied sehr deutlich an stark saugenden Ziegeln. Die Anwendung setzt allerdings großforma-

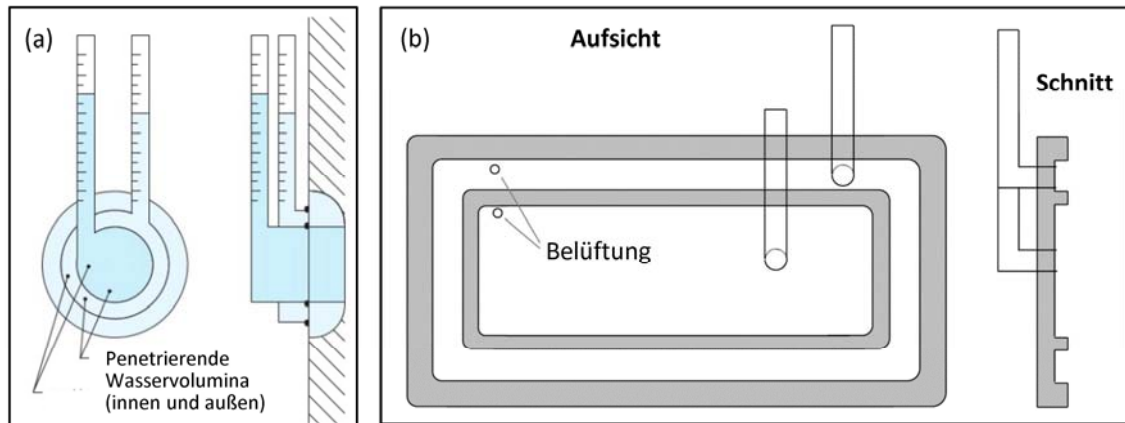


Abb. 3: (a) Wassereindringprüfer nach Pleyers [27,28]; (b) analog modifizierte Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke [29].

tige Ziegel voraus. Für die Messung der Wasseraufnahme über die Fuge und Fugengrenzfläche erwies sich das Pleyers-Röhrchen als ungeeignet. Bei einer analog modifizierten WA-Prüfplatte nach Franke, die Abb. 3b schematisch darstellt, erwies sich bereits die Abdichtung des Stegs zwischen beiden Kammern als außerordentlich schwierig. Zudem verteilte sich das Wasser immer noch lateral über die Fuge und trat in einiger Entfernung zur Messfläche seitlich entlang der Fugengrenzfläche aus [29].

Besser geeignet war die Abdichtung der Fugen entlang den Rändern der Messfläche bis in den angrenzenden Mauermörtel, um die seitliche Transportkomponente zu unterbinden [29]. Auch dann erfolgt nicht zwangsläufig ein eindimensionaler Wassertransport im Porengefüge, wie ihn die Normen zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten im Labor voraussetzen. Zum einen liegt für den Ziegel und Fugen-/Mauermörtel ein unterschiedlich starkes kapillares Saugvermögen vor, zum anderen lassen sich bei nahezu allen Mauerwerksaufbauten Fehlstellen im Mauermörtel nachweisen. Dem wird zwar in der Auswertung Rechnung getragen, indem die Messwerte in $L m^{-2} min^{-1}$ angegeben werden. In letzter Konsequenz wird aber nicht auf den Flächenbezug verzichtet. Deshalb wird im Konzeptansatz für das durchgeführte Forschungsvorhaben analog der Vorgehensweise von Franke auf die Umrechnung der vor Ort gewonnenen Messwerte des Verbundes auf eine flächenbezogene Angabe verzichtet.

Da die zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme vor Ort nicht prioritär für die Beantwortung der Frage benutzt werden soll, ob ein Hydrophobierungsmittel eingesetzt werden kann, ohne das gesamte Fugennetz zu erneuern, sondern als integraler Bestandteil der Objektanalyse dient, wurde zunächst die WA-Prüfplatte nach Franke für die Bestimmung der Wasseraufnahme des Verbundes eingesetzt und der Wassereindringprüfer nach Karsten für die Ermittlung der Wasseraufnahme der Ziegel, z.B. mit und ohne Brennhaut. Da die WA-Prüfplatte aus Polycarbonat besteht und somit bei einem Herabstürzen in der Regel nicht zerbricht, wurden statt der klassischen, sehr empfindlichen Karsten-Röhrchen aus Glas auch solche aus Kunststoff eingesetzt, die von der Fa. Remmers (Löningen) vertrieben werden (Abb. 4a). Das Karsten-Röhrchen aus Kunststoff besitzt eine Öffnungsweite von ca. 2.6 cm, welches einer Messfläche von ca.

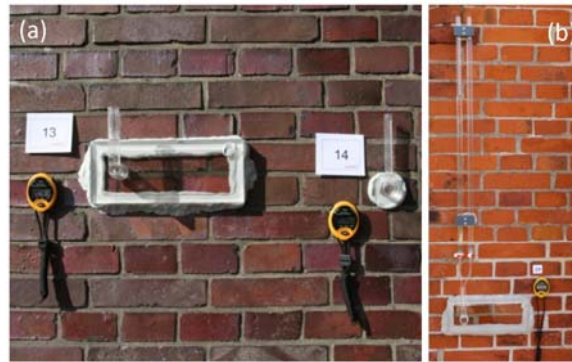


Abb. 4: (a) Zerörungsfreie Wasseraufnahmeprüfung mit der WA-Prüfplatte nach Franke auf dem Verbund und einem Wassereindringprüfer nach Karsten aus Kunststoff auf dem Ziegel (in diesem Fall als Kontrollmessung auf Hartbrandklinker, Krematorium Ohlsdorf, Hauptfriedhof in Hamburg); (b) Verbesserung der Einfülltechnik bei der Franke-Platte: anstatt eines Messzylinders lässt sich eine größere Genauigkeit mittels zweier Büretten erzielen. Ist die erste Bürette leergelaufen, kann diese, während die zweite zum Aufrechterhalten des Wasserpegels im Standrohr benutzt wird, wieder aufgefüllt werden.

5.3 cm^2 entspricht, eine Länge des Füllrohres von ca. 12.5 cm (Messung von der Oberkante der Messzelle aus) und einer Messskala von 0 bis 10 mL auf einer Länge des Einfüllrohres von 11 cm . Aufgrund der Skalenteilung ist prinzipiell eine Ablesung von 0.1 mL möglich.

Demgegenüber besitzt die WA-Prüfplatte eine Messfläche von ca. 207.5 cm^2 abzüglich der gerundeten Ecken von ca. 1 cm^2 . Aufgrund der nachgewiesenen Abhängigkeit der Wasseraufnahme von der Füllhöhe des Standrohres besitzt dieses keine Skalierung sondern nur einen Füllstrich in 50 mm Höhe über der Fugenmitte und wird mit einem Messzylinder nachgefüllt, so dass stets der gleiche Druck der Wassersäule auf die Fuge ausgeübt wird. Um das Procedere zu erleichtern, wurden zwei Kunststoffbüretten zum kontinuierlichen Nachfüllen des Standrohres bis zum Füllstrich in einer dafür konstruierten Halterung verbunden, die mit geeignetem Kitt an der Wand über der WA-Prüfplatte befestigt werden kann. Während die zweite Bürette zur Bestimmung der Wasseraufnahme eingesetzt wird, kann die erste, leere Bürette wieder aufgefüllt werden (Abb. 4b).

Bei der Anwendung am Mauerwerk der Grundschule auf Norderney stellte sich heraus, dass die Messfläche des Wassereindringprüfers nach Karsten für die Ziegel zu klein war und ein größerer Abstand zwischen den Teilstrichen der Skalierung die Ablesegenauigkeit deutlich erhöhen würde. Dem Konzept der WA-Prüfplatte nach Franke liegt zu Grunde, dass die Größe der Messfläche stets einen Ziegel sowie die Fläche der Lager- und Stoßfuge umfasst. Als Ziegelfläche wird das Normalziegelformat mit einer Sichtflächengröße von $240 \times 115 \text{ mm}^2$ vorausgesetzt. Streng genommen müsste für jedes andere Ziegelformat eine neue, daran angepasste WA-Prüfplatte verwendet werden. Je nach Mauerwerksverband kann der Anteil der Stoßfugen, die die Messfläche umfasst auch unterschiedlich sein. Für die Prüfung, ob einschaliges Mauerwerk schlagregensicher ist oder eine Durchfeuchtung als wahrscheinlich gilt, lässt sich die WA-Prüfplatte

im Hinblick auf die Streubreite und Genauigkeit der angegebenen Grenzwerte gut einsetzen.

Sollen die Aussagen aber darüber hinausgehen und die Messmethode universell für Ziegelmauerwerk anwendbar sein, d.h. für sämtliche Ziegelformate und Verbände, dann erweist sich eine runde Messfläche von 10 cm Durchmesser als besser geeignet. Konstruiert wurde eine quadratische Messplatte mit einer runden Messfläche, die entweder mittig auf die Lagerfuge oder an die Kontaktstelle zwischen Lagerfuge und nach oben führender Stoßfuge mit geeignetem Kitt appliziert wird. Letzteres bildet bei Ziegelmauerwerk meistens den Schwachpunkt hinsichtlich der Größe der Wasseraufnahme. Das Einfüllrohr befindet sich in Plattenmitte, also im Bereich der Lagerfuge, analog der Franke-Platte.

Die quadratische äußere Form hat den Vorteil, dass sich die Platte nach der Messung leichter vom Untergrund lösen lässt als eine runde Platte. Viele Messungen eines Projektteilnehmers mit der WA-Prüfplatte nach Franke im Rahmen von Gutachten zeigten, dass insbesondere in den Übergangsjahreszeiten, wenn gerade noch Messungen möglich sind, der am besten geeignete und empfohlene Kitt die Messfläche an der unteren Kante der Messplatte nicht ausreichend lange abdichtet und das Wasser nach unten austritt. Ein Drittel bis die Hälfte der Messungen mussten an anderer Stelle wiederholt werden, um auswertbare Ergebnisse zu erzielen. Schwachstellen bilden zudem die von der Lagerfuge nach unten führenden Stoßfugen. Außerdem lässt sich die WA-Prüfplatte bei starkem Relief des Ziegelsichtmauerwerks bzw. zurückversetzten Fugen/Schattenfugen nicht ausreichend gut abdichten, so dass eine Messdauer von ca. 15 Minuten möglich ist.

Die runde Messplatte besitzt mit einer Messfläche von nur ca. 78.5 cm^2 eine deutlich kleinere Fläche als die Franke-Platte, hat aber den Vorteil, dass eine Anbringung stets ohne eine von der Lagerfuge nach unten verlaufende Stoßfuge im Bereich der Messfläche möglich ist. Damit wird das Risiko des Auslaufens während des Messzeitraums drastisch reduziert, mit der Folge dass im gleichen Zeitraum mehr auswertbare Messergebnisse zur Verfügung stehen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Prüfplatte nicht durch Putzhaken oder Dübel mit Klammern zusätzlich befestigt werden muss.

Nach dem gleichen Prinzip wurde eine Messzelle mit einem Durchmesser von 4 cm aus Kunststoff gebaut, die für die zerstörungsfreie Messung der Wasseraufnahme von Ziegeln eingesetzt werden können. Diese Messzelle ist in Abb. 5a gezeigt. Auch für die große Messzelle kann der Füllstand des Standrohrs mittels zweier Büretten kontinuierlich auf der gleichen Höhe gehalten werden (Abb. 5b).

Im Hinblick auf die Entwicklung eines vor Ort einsetzbaren Verfahrens zur Trocknungsmessung, bei der zwecks Verwirbelung für die durchströmende Luft eine runde Messzelle notwendig ist, wird die Befeuchtung am Gebäude vorher an der gleichen Stelle mit einer runden Messkammer mit Füllrohr durchgeführt. Aufgrund dessen bot sich ebenfalls für die reinen Messungen der Wasseraufnahme, die einer sehr viel kürzeren Messzeit bedürfen als Trocknungsmessungen, eine runde Messzelle mit gleichem Durchmesser an.



Abb. 5: (a) Vergrößerung der Messfläche des Wassereindringprüfers nach Karsten auf einen Durchmesser von 4 cm in Kunststoffausführung. (b) Statt der WA-Prüfplatte nach Franke wurde auf eine runde Karsten-Prüfplatte (Durchmesser 10 cm) zurückgegriffen, mit der die Wasseraufnahme sämtlicher gängiger Mauerwerksverbände und Ziegelformate gemessen werden kann; die Einfüllhöhe des Standrohres kann ebenfalls mit einer Doppelbürette auf der vorgesehenen Höhe gehalten werden.

Durch die Modifizierung der Messzellen und der Methodik soll die zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme vor Ort integraler Bestandteil einer Zustandsanalyse bestehender, unter Denkmalschutz stehender Ziegelbauwerke werden. Damit sollen Aussagen darüber ermöglicht werden, ob:

- Durchfeuchtungen der Wandquerschnitte zu befürchten sind.
- eine hydrophobierende Imprägnierung eine Möglichkeit darstellt, die Wasseraufnahme ausreichend zu reduzieren, insbesondere wenn durch eine mögliche kapillarleitende Innendämmung die Temperatur im Mauerwerksquerschnitt herabgesetzt wird.
- ein Unterschied in der Wasseraufnahme zwischen Ziegeln mit und ohne Brennhaut besteht und welche Konsequenzen sich im Rahmen einer Instandsetzung ergeben.
- ein Unterschied in der Wasseraufnahme zwischen optisch intaktem Mauerwerksverbund und Bereichen mit feinen Haarrissen im Fugenmörtel und feinen Fugenflankenabrissen erkennbar ist, um entscheiden zu können bis zu welchem Grad der Fugenmörtel zu ersetzen ist, was eine Rückübertragung auf die sichtbaren Unterschiede des Fugennetzes beinhaltet.
- bei Eisenteilen im Mauerwerk, wie z.B. Träger in Fensterstürzen oder Querriegel von Deckenträgern, bei allen Rissbreiten so viel Wasser hinter die erste Ziegellage gelangt, dass sämtliche Träger ausgetauscht werden müssen oder ob durch die Kombination aus Sondierungsöffnung und Beurteilung des Trägerzustandes, zerstörungsfreier Wasseraufnahmeprüfung und Rissbreitenmessung eine differenzierte Vorgehensweise, die zugleich substanzschonend und kostensparend ist, ermöglicht wird.

2.1.3 Kammermethode zur Bestimmung der hygrokopischen Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurde, besitzt eine runde, ausreichend große Karsten-Prüfplatte viele Vorteile bei der Bestimmung der kombinierten Wasseraufnahme von Fugenmörtel und Ziegel. Eine runde Kammer besitzt außerdem den großen Vorteil, dass bei der Verwendung der Kammer zur Bestimmung der Trocknungsrate günstigere Strömungsbedingungen herrschen, da die Kammer keine Ecken besitzt, in denen unkontrollierte Strömungsverhältnisse, z.B. durch stagnierende Luft, auftreten könnten. Bei der Konstruktion der kombinierten Kammer zur Bestimmung von kapillarer Wasseraufnahme sowie der anschließenden Messung der Trocknungsrate wurde deshalb eine quadratischen Grundplatte mit einer kreisförmigen Öffnung mit einem Durchmesser von 10 cm verwendet. Auf dieser Grundplatte kann je nach Messaufgabe entweder ein Aufsatz zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme oder aber eine mit definierter Luft durchströmte Kammer zur Bestimmung der Trocknungsrate nach der Kammermethode befestigt werden. Schematische Zeichnungen, die den Aufbau der beiden Messsysteme zeigen, sind in Abb. 6 dargestellt. In Abb. 7 sind die endgültigen Ausführungen beider Messvarianten zu sehen.

In der linken Darstellung in Abb. 6 ist grün eingefärbt die Rückwand für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme zu sehen, die den Anschluss für das vertikale Befüllrohr (blau) trägt, das von einer Burette versorgt wird. In der Grundplatte befinden sich oben und unten Öffnungen, die für die Belüftung und für das Ablassen des Wassers verwendet werden können. Rechts in Abb. 6 ist die mit einem Ventilator versehene Kammer zur Messung der Trocknungsrate dargestellt. Vom in der Grundplatte eingelassenen Ausgang der durchströmten Kammer wird die Luft in eine zweite, auf der Rückseite der Strömungskammer befestigten kleineren Kammer geleitet, in der sich der kombinierte Temperatur- und Feuchtefühler (Rotronic, Typ HC 2-IE) befindet. Die in die Kammer durch die Öffnung auf der Unterseite der Grundplatte eindringende Luft stammt entweder aus einem Feuchtegenerator und besitzt deshalb eine definierte (geregelt) Luftfeuchtigkeit oder es handelt sich einfach um Umgebungsluft, deren Temperatur und Luftfeuchtigkeit zuvor mit einem zweiten Sensor bestimmt wurde. Die endgültige Ausführung der Messkammern ist in Abb. 7 dargestellt. Die Grundplatte und alle weiteren nicht durchsichtigen Bauteile in Abb. 7 bestehen aus Polyoxmethylen (POM). Die Rückwände sind in Acrylglas (PMMA) gefertigt.

Eine beispielhafte Messung zur Veranschaulichung des Messprinzips ist in Abb. 8 dargestellt. Bei diesen Messungen wurde die Kammer auf einem kapillar wassergesättigten Prüfkörper aus Maulbronner Sandstein befestigt. Dabei wird die gleiche Dichtungsmasse verwendet, die auch bei der Befestigung von Karsten-Röhrchen und Franke-Platte Verwendung findet (Terostat IX, Loctite, Henkel). Während der Messungen wurde mit Hilfe einer Membranpumpe kontinuierlich vorgetrocknete Luft mit einem konstantem Volumenstrom durch die Kammer gesaugt. Typische Volumenströme bei Verwendung der Kammer betragen $0.09 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Messungen am Objekt) bis zu $0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Messungen im Labor). Zur Entfeuchtung der angesaugten Luft wurde eine Schüttung mit einem entwässerten Zeolithen (13X) als Trockenmittel verwendet, mit der am Kammereingang

eine relative Luftfeuchtigkeit von nahezu 0% r.F. erreicht wurde. Während der Messungen ist die Kammer ständig ventiliert, um eine ideale Durchmischung zu gewährleisten. Somit entspricht die am Kammerausgang gemessene relative Luftfeuchtigkeit der Luftfeuchtigkeit in der Kammer während der Trocknung. Unter solchen Bedingungen ist der Abtransport des von der Gesteinsoberfläche verdunstenden Wassers nicht geschwindigkeitsbestimmend, so dass die Trocknungsrate hauptsächlich durch den Transport von flüssigem Wasser bzw. von Wasserdampf an die Gesteinsoberfläche und die Verdunstungsrate limitiert wird.

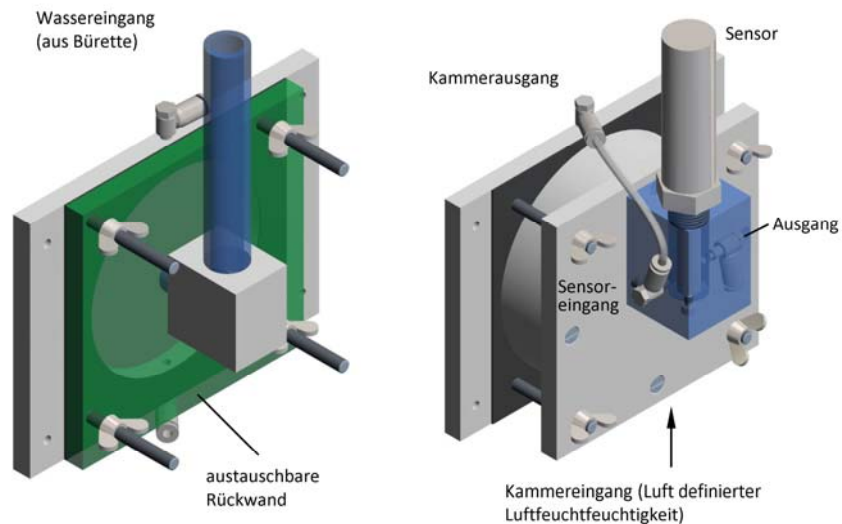


Abb. 6: Schematische Darstellung der kombinierten Messkammer mit Rückwand zur Messung der kapillaren Wasseraufnahme (links) und durchströmter Kammer (rechts) mit Ventilator und kombiniertem Feuchte- und Temperatur-Sensor.

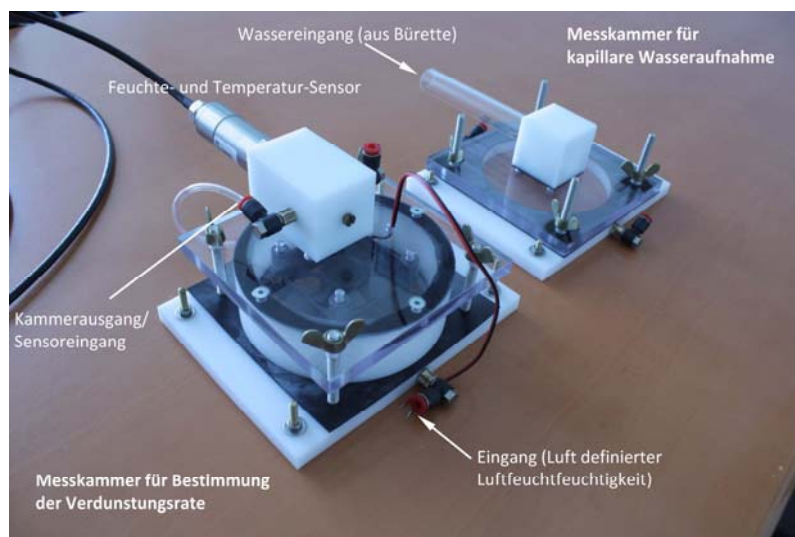


Abb. 7: Endgültige Ausführung beider Kammerensysteme. Links: ventilierte Messkammer für die Bestimmung der Verdunstungsrate mit kombiniertem Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor; rechts: Messaufbau mit ausgetauschter Rückwand für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme.

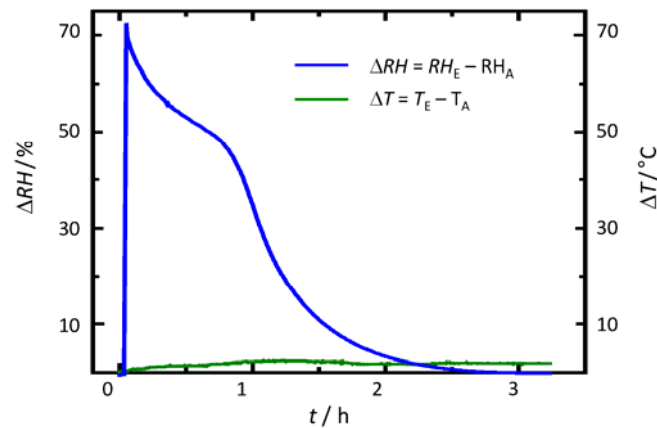


Abb. 8: Mit der Kammermethode gemessener Verlauf der Trocknung eines kapillar mit Wasser gesättigten Prüfkörpers aus Maulbronner Sandstein; dargestellt sind die gemessenen Veränderungen von relativer Luftfeuchtigkeit (blaue Kurve) und Temperatur (grüne Kurve) beim Durchströmen der Kammer mit trockener Luft (am Kammereingang).

Die blaue Kurve in Abb. 8 beschreibt die Differenz zwischen den relativen Luftfeuchtigkeiten am Kammerausgang und am Kammereingang (ΔRH) und kann somit direkt zur Bestimmung des Feuchteflusses verwendet werden. Nach anfänglichem starkem Anstieg der Luftfeuchtigkeit mit der einsetzenden Verdunstung (Einschwingphase) wird sehr schnell ein Maximum der Feuchtigkeit am Kammerausgang gemessen. Da sich die Verdunstungsrate direkt proportional aus der Differenz der Luftfeuchtigkeiten ergibt, entspricht dieses Maximum auch einer maximalen Verdunstungsrate. Die anfängliche maximale Rate ist auch in einer ventilierten Kammer durch den Abtransport des von der Oberfläche abgegebenen Wasserdampfs limitiert. Sobald aber der Kapillartransport zur Oberfläche und der Verdunstungsprozess limitierend werden, sinkt die gemessene Differenz der Luftfeuchtigkeiten, d.h. die Trocknungsrate nimmt ab. Nach etwa drei Stunden ist der Trocknungsprozess abgeschlossen, d.h. die am Kammereingang einströmende trockene Luft nimmt bei Durchströmen der Kammer keinen Wasserdampf mehr auf. Die grüne Kurve gibt den Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Kammereingang und Kammerausgang ($T_E - T_A$) an. Positive Werte bedeuten also, dass sich die Luft beim Durchströmen der Kammer abkühlt. Dies ist Folge des endothermen Verdunstungsprozesses.

Die bei Messungen mit der Kammermethode primär bestimmten Feuchtigkeits- und Temperaturdifferenzen können bei bekanntem Volumenstrom durch die Kammer in einen Wasserdampfstrom umgerechnet werden. Für den Fluss F gilt:

$$F = (f_E - f_A) Q/A \quad (1)$$

wobei f_E und f_A die absoluten Feuchtigkeiten am Kammereingang und am Kammerausgang sind, die unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz aus den relativen Feuchten berechnet werden müssen. Q ist der Volumenstrom und A ist die in der Kammer exponierte Materialfläche. Werden die absoluten Feuchtigkeiten in g m^{-3} , der

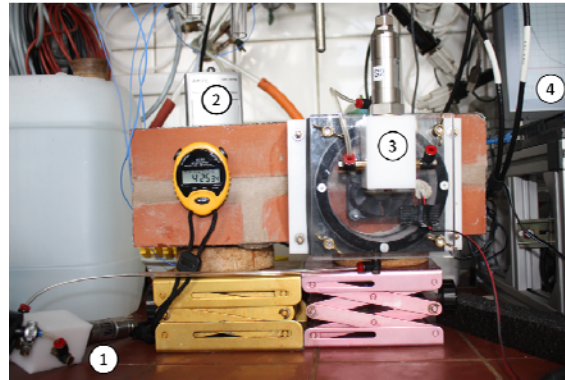


Abb. 9: Versuchsaufbau bei den Messungen zum Trocknungsverlauf eines Ziegel-Mörtel-Verbundprüfkörpers mit der Kammermethode. Feuchte- und Temperatur-Messung am Kammereingang (1), in der Umgebungsluft (mit Logger) (2) und am Kammerausgang (3) sowie Messwerterfassung (4).

Volumenstrom in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ und die exponierte Fläche in m^2 angegeben, so erhält man mit Gleichung (1) den Fluss von Wasserdampf aus dem oder in das Material zu jedem Zeitpunkt in $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Die Umrechnung der relativen Luftfeuchtigkeit $\varphi = p_w/p_{w,0}$ in den Wasserdampfpartialdruck p_w erfolgt mit dem Sättigungspartialdruck $p_{w,0}$ bei der entsprechenden Temperatur nach. Sättigungspartialdrücke wurden nach [30] berechnet. Die Berechnung der absoluten Feuchtigkeit erfolgt dann nach

$$f = p_w M_w / (RT) \quad (2)$$

In Gleichung (2) sind $M_w = 18.0153 \text{ g mol}^{-1}$ die molare Masse von Wasser, R die allgemeine Gaskonstante ($R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) und T die absolute Temperatur.

Die Vorzeichenkonvention in Gleichung (1) ist derart, dass sich für Trocknungsvorgänge ($f_E < f_A$) ein negativer Fluss ($F < 0$) ergibt. Bei der hygroskopischen Wasseraufnahme ($f_E < f_A$) ist der Fluss entsprechend positiv. Durch Integration erhält man die insgesamt (kumulativ) aufgenommene oder abgegebene Wassermenge. Bei Trocknungsmessungen, die im Rahmen dieses Vorhabens im Vordergrund stehen, kann dann die kumulative Wasserabgabe mit der kapillaren Wasseraufnahme verglichen werden.

Zur weiteren Überprüfung des Verfahrens wurden vergleichende Messungen des Trocknungsverhaltens zweier Verbundprüfkörper bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten durchgeführt. Bei einem der bei diesen Messungen verwendeten Prüfkörper handelte es sich um einen flankenversiegelten Block aus drei gemauerten Ziegeln (vgl. Kap. 1, Abb. 13d, S. 24). Die zur Herstellung verwendeten Ziegel sind Austauschmaterial zur Verwendung an der Grundschule in Norderney, ebenso wie der bei der Herstellung der Prüfkörper verwendete Fugenmörtel. Bei dem zweiten Prüfkörper handelte es sich um einen Bohrkern mit einem an die Größe der Messkammer angepassten Durchmesser von 10 cm, der ebenfalls flankenversiegelt wurde. Der Versuchsaufbau bei der Trocknungsmessung am großen Prüfkörper ist in Abb. 9 dargestellt.

Die Messungen erfolgten alle in der gleichen Position auf dem Prüfkörper. Dabei wurde die Messzelle über einer Lagerfuge und einer nach oben gerichtete Stoßfuge befestigt.

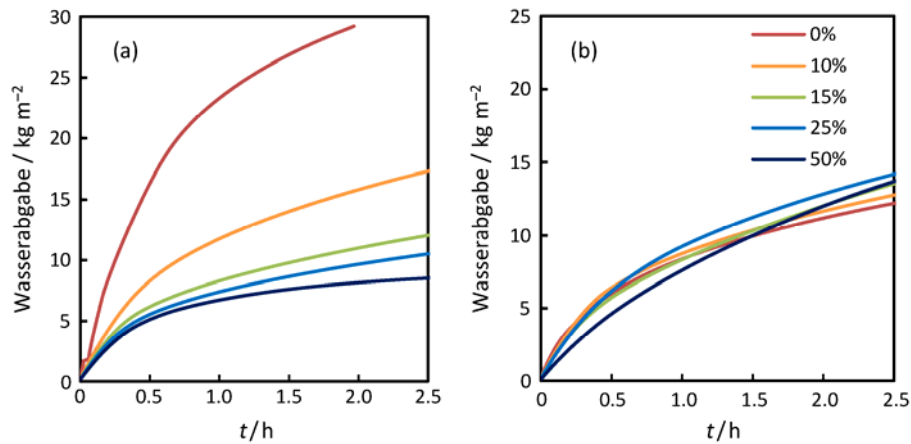


Abb. 10: Trocknungskurven wassergesättigter Prüfkörper bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten (0–50%). (a) kumulative Wasserabgabe eines Verbund-Prüfkörpers (vgl. Kap. 1, Abb. 13d, S. 24); (b) kumulative Wasserabgabe eines flankenversiegelten Bohrkerns aus einem Verbundprüfkörper (vgl. Kap. 1, Abb. 13c, S. 24) mit 10 cm Durchmesser.

Vor jeder Messung des Trocknungsverlaufs wurde der Prüfkörper mit Hilfe der Kammer unter Verwendung der Rückwand für die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme gesättigt. Im Anschluss wurde die Rückwand ausgetauscht und die Trocknung wurde messtechnisch verfolgt. Zwischen den einzelnen Messzyklen wurde mindestens zwei Tage gewartet. In dieser Zeit lagerte der Probenkörper bei Umgebungsbedingungen. Die Überprüfung der Konditionierung erfolgte durch Wägung.

Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Trocknung zu untersuchen, wurde Luft einer definierten Feuchte durch die Trockenkammer geleitet. Der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme und der Wasserabgabe ist in Abb. 10 wiedergegeben. Zwischen einem kompletten Befeuchtungs-/Trocknungs-Zyklus wurden die Prüfkörper jeweils bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Trockengeschwindigkeit in Abb. 10a. Bei relativen Luftfeuchtigkeiten von nahe 0% bzw. bei 10% erfolgt die Trocknung wesentlich schneller als bei höheren Feuchtigkeiten. Zwischen 15% und 50% relativer Feuchte ist immer noch eine Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit mit abnehmender Feuchtigkeit festzustellen, der Einfluss ist allerdings deutlich kleiner.

Demgegenüber zeigt das Trocknungsverhalten des flankenversiegelten Bohrkerns praktisch keine Feuchteabhängigkeit im Bereich zwischen 0% und 50% Luftfeuchtigkeit. Die in Abb. 10b ersichtlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Messserien zeigen keinen regelmäßigen Trend und repräsentieren wohl eher die Reproduzierbarkeit der Messmethode als einen realen Feuchteeinfluss. Dennoch sind die Ergebnisse überraschend, da für einen echten eindimensionalen Trocknungsvorgang, wie er in einem flankenversiegelten Prüfkörper stattfindet, dessen Oberfläche gerade der Kammerfläche entspricht, eine Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit zu erwarten wäre. In jedem Fall zeigen die offensichtlichen Unterschiede zwischen den Messungen unter bauwerksähnlichen Bedingungen und die Messungen mit dem flankenversiegelten Prüfkörper, dass

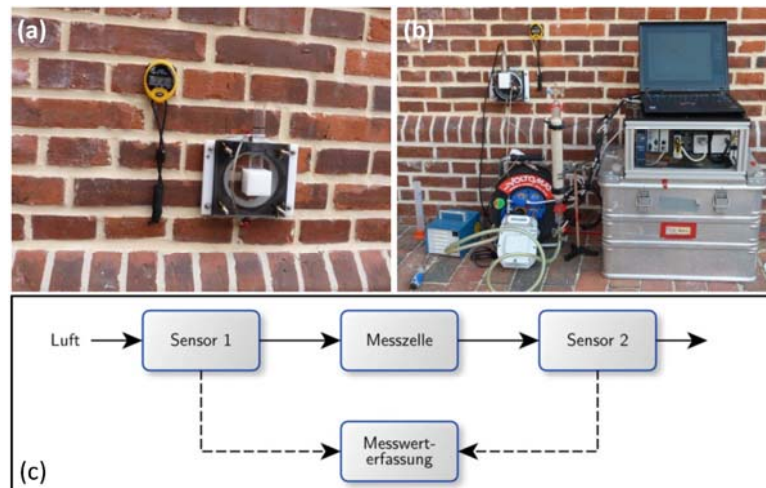


Abb. 11: Einsatz der neu entwickelten Messkammer an der Grundschule Norderney. (a) Verwendung der Kammer zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme; (b) Bestimmung des Trocknungsverlaufs (Kammer mit Temperatur- und Feuchte-Sensor, Membranpumpe, Trockenturm und Messwert-erfassung); Schematischer Versuchsaufbau bei den Trocknungsmessungen mit der Kammermethode. Durchgezogene Linien beschreiben die Luftströmung, gestrichelte Linien die Übergabe von Messwerten.

lateralen Transport natürlich, ebenso wie bei der Messung der kapillaren Wasseraufnahme auch bei Trocknungsmessungen nicht vernachlässigt werden kann.

Der Einsatz der kombinierten Messkammer an der Grundschule in Norderney ist in Abb. 11 zu sehen. Zu Beginn einer Messung wird die Grundplatte der Messkammer mit Dichtungsmasse (Terostat IX) auf dem Mauerwerk befestigt. Zunächst erfolgt die Messung der kapillaren Wasseraufnahme. Dazu wird der Deckel mit dem Füllrohr auf der Kammer befestigt und die Kammer wird blasenfrei mit Wasser befüllt. Das aufgenommene Wasservolumen wird analog der Messungen mit Franke-Platte bzw. Karsten-Röhrchen abgelesen. Während der Messung wird die Höhe des Wasserstandes im Füllrohr unter Verwendung von Büretten konstant gehalten. In der linken Abbildung (Abb. 11a) ist die Verwendung der Kammer zur Messungen der kapillaren Wasseraufnahme zu erkennen. Mit der in dieser Variante installierten Rückwand entspricht die Kammer in ihren Abmessungen exakt der großen Karsten-Platte (vgl. Abb. 5b).

Nach Beendigung der Wasseraufnahmemessung wird die Zelle entleert und der Deckel mit Füllrohr wird entfernt. Es wird nun der Deckel für den Betrieb der Kammer zur Trocknungsmessung montiert, der mit einem Ventilator und den Öffnungen für Luftströmung und den kombinierten Temperatur- und Feuchte-Sensoren ausgestattet ist. Die Messwert-erfassung zur Aufzeichnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte während der Trocknung wird dann gestartet. Durch den Anschluss der Pumpe an den Eingangssensor wird die Trocknung eingeleitet.

In der rechten Abbildung (Abb. 11b) ist der vollständige für die Messung der Trocknung erforderliche Aufbau zu sehen. Die analogen Ausgangssignale für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit der beiden Sensoren vom Typ HC2 (Rotronic) wird an die Messwert-erfassung (NI cRIO-9074, NI 9205, National Instruments Germany GmbH)

übergeben und anschließend mit einem PC weiter verarbeitet und gespeichert (Abb. 11b, rechts). Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 11c dargestellt. Durchgezogene Linien beschreiben die Luftströmung, gestrichelte Linien die Übergabe von Messwerten. Für die Trocknung des Mauerwerks wird ein Luftstrom mit einer Membranpumpe (links im Bild), die entweder Umgebungsluft oder vorgetrocknete Luft ansaugt, durch die Messzelle geleitet. Um die Luft zu trocknen, wird diese über einen mit Zeolith (X13) befüllten Trockenturm (Bildmitte) geleitet. Das durch die Messkammer gesaugte Volumen wird mit einer Gasuhr bestimmt. Beispielhafte Messergebnisse bei Verwendung der Messkammer werden in Kap. 4.2 vorgestellt.

2.2 Weitere verwendete Messmethoden

2.2.1 Salzanalytik

Alle Untersuchungen zur Bestimmung der Salzbelastung des Mauerwerks wurden als Profilmessungen ausgeführt, um die Verteilung der Salze bis in die Mauerwerkstiefe zu bestimmen. In einer ersten Serie von Probenahmen wurden sieben Bohrungen jeweils ausgehend von Mörtelfugen gebohrt bis in Tiefen von 40 cm gebohrt und das Bohrmehl aus verschiedenen Tiefensegmenten wurde gesammelt. Um den zu erwartenden starken Gradienten der Salzbelastung an den Materialoberflächen zu erfassen, wurden zusätzlich vor Ort Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm entnommen, die nachfolgend im Labor weiter aufgearbeitet wurden. Zunächst erfolgte entlang der Längsachse die Aufteilung in zwei Hälften, von denen eine für die Herstellung von Dünnschliffen verwendet wurde. Die zweite Bohrkernhälfte wurde mit Hilfe einer Fräsprobenahme und einer Gesteinssäge weiter aufgearbeitet, um im oberflächennahen Bereich Proben mit hoher Tiefenauflösung zu gewinnen. Durch vorsichtiges Abtragen mit einer Fräse und Auffangen des anfallenden Staubes gelang die Beprobung mit sehr hoher Auflösung von nur 0.5 mm für das erste Tiefenintervall. Für die weiteren Segmente wurden Stärken von 2–10 mm für ausreichend erachtet.

Die Bohrmehlproben wurden im Labor nach Trocknung bei 60 °C und wässriger Elution auf ihren Gehalt löslicher Salze untersucht. Bei der Elution wurden die Einwaagen und Elutionsvolumina so gewählt, dass Einwaage/Volumen-Verhältnisse von 50 mL g⁻¹ nicht überschritten wurden (vgl. die Diskussion in Kap. 4.2.4, S. 53). Zur Elution wurde doppelt destilliertes Wasser verwendet. In den wässrigen Eluatzen wurden nach Filtration und Verdünnung die Hauptbestandteile mittels Flammen-Atomemissionsspektrometrie (Natrium und Kalium), Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (Magnesium und Calcium) sowie mittels Ionenchromatographie (Chlorid, Nitrat, Sulfat) bestimmt. Die atomspektrometrischen Messungen erfolgten mit dem Spektrometer iCE 3300 (Thermo Scientific). Die ionenchromatographischen Bestimmungen unter Verwendung der Suppressor-Ionenchromatographie mit Leitfähigkeitsdetektion (ICS 1000, Dionex) unter Verwendung eines Eluenten aus 3.5 mmol L⁻¹ Na₂CO₃ / 1 mmol L⁻¹ NaHCO₃. Die Bestimmungsgrenzen quantitative Bestimmungen unter Verwendung dieser Methoden und Elutionsbedingungen betragen 10 mg kg⁻¹ (Chlorid, Magnesium), 15 mg kg⁻¹ (Nitrat), 25 mg kg⁻¹ (Natrium, Kalium, Sulfat) und 40 mg kg⁻¹ (Calcium).

2.2.2 Optische Mikroskopie

Von den für die Baustoffuntersuchung eingesetzten üblichen mikroskopischen Methoden stand für Untersuchungen am Objekt nahezu ausschließlich die Polarisationsmikroskopie im Vordergrund. Im Rahmen der Gutachtenerstellung wurden ergänzend zu der chemischen Mörtelanalytik petrografische Dünnschliffe mit blau eingefärbtem Kunstharz, welches eine bessere Differenzierung der Poren von den Festkörperbestandteilen bei porösen Baustoffen erlaubt, mit dem Polarisationsmikroskop untersucht, um zu überprüfen, ob Restklinkerkörner von Zement vorhanden sind, ob Kalkspatzen oder Kalkklümpchen auftreten, ob Kalksteinanteile im Zuschlag vorhanden sind und wie das Gefüge ausgebildet ist, d.h. welche Verteilung von Bindemittel und Zuschlag vorliegt.

Verwendet wurde ein Polarisationsmikroskop der Fa. Olympus vom Typ CX41. Analog wurde der Mörtel des Wasserturms untersucht, wobei aufgrund der begrenzten Auflösung der Lichtmikroskopie sowie der damit auch verbundenen Einschränkung der Identifizierung der Bestandteile anhand ihrer optischen Eigenschaften auf mehr als 25 μm große Mineralphasen, wurden kleinere Kristalle zusätzlich an Bruchproben mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit daran gekoppelter Röntgenmikrobereichsanalyse (EDX) untersucht. Auf diese Weise lassen sich z.B. auch Treibminerale eindeutig identifizieren.

Darüber hinaus wurde die Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen von Sandwichproben eingesetzt, d.h. Bohrkerne die die Lagerfuge und den oben und unten angrenzenden Ziegel umfassen. Auf diese Weise lassen sich nicht nur die drei Baustoffe Fugen-, Mauermörtel und Ziegel im Hinblick auf ihre Veränderungen in der Oberflächenebene analysieren, sondern auch ihre Veränderungen entlang der Grenzflächen.

Vor Ort wurden die Oberflächen versuchsweise mit einem einfachen mobilen Digitalmikroskop sowie mittels Digitalkamera mit Makroobjektiv dokumentiert, um zu prüfen, ob dadurch zusätzliche wichtige Kenntnisse, die für die Interpretation des Feuchte- und Salztransportes gewonnen werden konnten.

2.2.3 Bestimmung von Feuchtekwerten

Die maximale Wasseraufnahme bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck und der Wasseraufnahmekoeffizient w (in $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1/2}$) wurden an verschiedenen Ausbauziegeln und an Ersatzmaterialien der Grundschule Norderney, wie Ersatzziegel und –mörtel im Labor in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 [12] durchgeführt, allerdings mit einer höheren Anzahl an Messintervallen und davon abweichenden Probengrößen. Um das Trocknungsverhalten der an der Grundschule zum Einsatz kommenden Austauschmaterialien zu charakterisieren, erfolgte im Labor weiterhin eine Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl nach DIN EN ISO 12572 [31] und der Trocknung in Anlehnung an [32]. Um der Besonderheit des hohen Anteils an Fugen an der Gesamtoberfläche von Ziegelmauerwerk zu berücksichtigen, wurden auch analoge Messungen der kapillaren Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens mit Verbundprüfkörpern aus Ziegel und Mörtel durchgeführt. Die genaue Vorgehensweise und die dabei verwendeten Prüfkörper werden ausführlich in Kap. 1 vorgestellt. Schließlich wurden umfang-

reiche Vergleichsmessungen unter Verwendung der kleinen Karsten-Platte (Abb. 5) durchgeführt, um den Einfluss der Füllstandhöhe auf die kapillare Wasseraufnahme zu überprüfen und um die Vergleichbarkeit von Messungen mit der Karsten-Platte (mit lateraler Ausbreitungskomponente) und w -Wert-Bestimmungen zu überprüfen. Auch im Fall dieser Messungen wird die genaue Vorgehensweise in Kap. 1 vorgestellt.

2.2.4 Bohrwiderstandsmessung

Die Möglichkeiten der Bohrhärtewiderstandsmessungen als minimalinvasive Methode haben sich in den letzten Jahren hinsichtlich Qualität, Handhabung und Messgeschwindigkeit signifikant verbessert. Mit den heute üblichen Geräten lassen sich bis zu 10 Bohrungen pro Stunde durchführen [33–37]. Diese Methode wurde deshalb auch für Ziegelmauerwerk in Ergänzung zur zerstörungsfreien Prüfung der Wasseraufnahme, im Sinn eines Messverfahrens als integraler Bestandteil eines objektspezifischen Untersuchungskonzeptes für denkmalgeschützte Bauwerke eingesetzt. Für Ziegelmauerwerk existieren noch keine systematischen Untersuchungen, die Auskunft über den Bohrwiderstand, also die tiefenabhängige Festigkeit, geben. Es ist aber zu erwarten, dass die Methode gut geeignet ist für die Untersuchung von

- Ziegeln mit Brennhaut und Schalenbildung
- Ziegeln mit rückgewitterter Oberfläche
- verschiedenen Arten von Fugenmörteln
- der Kontaktfläche zwischen Fugenmörtel und Mauermörtel
- zur Unterscheidung von Stoß- und Lagerfugen
- der Veränderung der Fugenfestigkeiten vor und nach einer Instandsetzung

Umfangreiche Bohrhärtewiderstandsmessungen wurden an Ziegeln unterschiedlichen Verwitterungszustandes und Mörtelfugen der Grundschule in Norderney mit dem mobilen Bohrhärtewiderstandsgerät DMRS von SINT-technology (Mailand) durchgeführt (vgl. Abb. 12). Mit dem Gerät lassen sich Veränderungen mit der Tiefe als minimalinvasive Methode erkennen und diese können näherungsweise als Druckfestigkeiten interpretiert werden.



Abb. 12: Einsatz des Bohrwiderstandsmessgerätes an der Westseite der Grundschule Norderney.

3 Laboruntersuchungen

Feuchtetechnische Kenndaten zur Charakterisierung der an der Grundschule Norderney verwendeten Materialien wurden in Laboruntersuchungen ermittelt. Es wurden die maximale Wasseraufnahme bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck sowie der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) sowohl an ausgebauten Bestandsziegeln als auch an zwei unterschiedlichen, für den Austausch vorgesehenen bzw. inzwischen tatsächlich verwendeten Ziegelmaterialien bestimmt. Die Bestimmung des w -Wertes diente vor allem auch dem Vergleich mit den am Objekt durchgeführten Wasseraufnahmemessungen mit der kleinen Karsten-Platte (vgl. Abb. 5a, S. 13).

Bei den Ersatzmaterialien handelt es sich zunächst um Ziegel der Ziegelei in Glindow, (Brandenburg) die für die Instandsetzung des Uhrenturms der Grundschule verwendet wurden. Entgegen dem ursprünglichen Aufbau aus einer Stahlkonstruktion mit einer Außenhülle aus Ziegelmauerwerk, wurde der neue Uhrenturm mit einer Unterkonstruktion aus Stahlbeton gebaut. Die Ziegel wurden bereits vor dem Einbau des Uhrenturms in die Dachkonstruktion auf die Segmente aus Stahlbeton im vorgegebenen Ziegelverband gemauert. Das zweite Ersatzmaterial, es handelt sich um Ziegel der Fa. Wehrmann (Weyhe, Niedersachsen), wurde für die Ausbesserung einzelner auf der Westseite entnommener Ziegel verwendet. Ihr Format ist geringfügig kleiner als das der Bestandsziegel.

Neben dem reinen Wasseraufnahmeverhalten wurden auch Untersuchungen zum Trocknungsverhalten sowie zum Wasserdampftransportverhalten durchgeführt. Für diese Messungen wurden ebenfalls Ziegelmaterial der Ziegelei Glindow (Brandenburg) verwendet. Darüber hinaus wurden auch Messungen an Mörtelprüfkörpern sowie vor allem an Verbundprüfkörpern aus Ziegel und Mörtel durchgeführt, um das Wasseraufnahme- und Trocknungsverhalten eines Verbundmauerwerks zu simulieren. Die dabei verwendeten Prüfkörper sind in Abb. 13 dargestellt. Bei dem verwendeten Mörtel handelt es sich um den Restauriermörtel SK (Fa. Remmers, Löningen), der im ersten Baubaschnitt an der Grundschule und bei der Anlage einer weiteren Musterfläche an der Grundschule eingesetzt wurde (vgl. Kap. 4.2). Die Mörtelprüfkörper und auch die Verbundprüfkörper wurden im Labor unter optimalen Bedingungen (plastische Konsistenz) hergestellt. Aus diesem Mörtel und den Ziegeln aus Glindow wurden auch die Verbundprüfkörper bestehend aus zwei ganzen und zwei halben Ziegeln und Fugenmörtel hergestellt.

Wasseraufnahmekoeffizienten der an einem Bauwerk verbauten Ziegel weisen häufig recht große Streuungen auf, was aus den unterschiedlichen Temperaturen beim Brennen, selbst im Ringofen resultiert. Hier gibt zumeist gibt der Farbton des Scherbens bereits einen Hinweis. Bei gleicher Herstellung und vorausgesetzt die Tone stammen aus dem gleichen Vorkommen, lassen hellere, eher orangefarbene Ziegel auf eine niedrigere Brenntemperatur schließen als dunklere, eher rote Ziegel. In der Konsequenz ist davon auszugehen, dass gleiche Verwitterungsbilder nicht unbedingt mit der gleichen Wasseraufnahme verbunden sind. Deshalb wurden die Ausbausteine für die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme in zwei Hälften gesägt, wobei von der einen Hälfte die Wasseraufnahme nach seitlicher Abdichtung des Prüfkörpers von der Sicht-

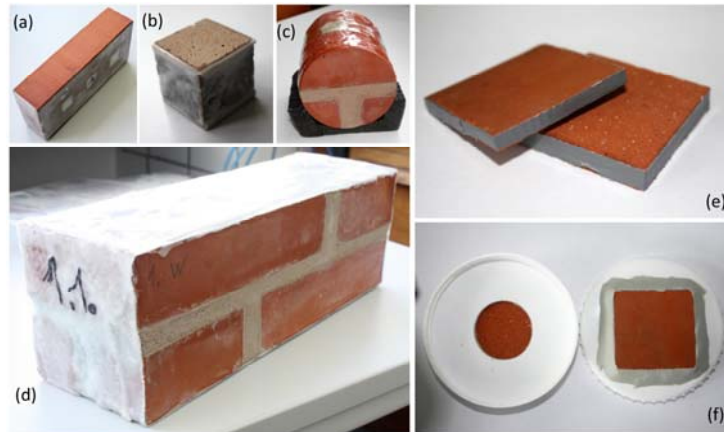


Abb. 13: Für die Bestimmung feuchtetechnischer Kenndaten verwendete Prüfkörper. (a–d): Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme; (e,f): Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes von Ziegeln.

seite und von der anderen Hälfte die Wasseraufnahme des Querschnittes, also der Schnittfläche, gemessen wurde. Bei im Strangpressverfahren hergestellten Ziegeln sind die Poren am Rand häufig anders orientiert als im Kernbereich des Ziegels. Zudem können sie sich auch in der Größe unterscheiden, weshalb die Messung der Wasseraufnahme an der mittig gelegenen Schnittstelle einen integralen Messwert darstellt.

Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten und maximale Wasseraufnahmen unter Atmosphärendruck von Ausbau- und Austauschziegeln sind in Tab. 5 zusammengefasst. Bei allen Vergleichen der Wasseraufnahme über die äußere Fläche (Sichtfläche) und über die Schnittfläche (Querschnitt) ist erwartungsgemäß eine geringere Wasseraufnahme über die Sichtfläche bestimmt worden. Insgesamt streuen die w -Werte der untersuchten Ausbauziegel sehr stark zwischen $4.1\text{--}17.8\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1/2}$ (Sichtflächen) und $5.1\text{--}19.3\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1/2}$ (Querschnittsflächen). Die Frage, inwiefern die Brennhaut eine zusätzliche Verringerung der Wasseraufnahme bewirkt, kann mit diesen Messungen nicht beantwortet werden, da die veränderte Porosität und Porenradienverteilung in den Randbereichen einer großen Variationsbreite unterliegt.

Die gleichen Unterschiede der Wasseraufnahme über Sichtfläche und im Querschnitt zeigen auch Austauschziegel der Fa. Wehrmann, wobei die w -Werte deutlich kleiner sind und sich am unteren Ende Streubereiches der Austauschziegel befinden. Demgegenüber sind die Wasseraufnahmekoeffizienten der Austauschziegel etwa doppelt so hoch und repräsentieren, verglichen mit dem Ausbaumaterial, mittlere Wasseraufnahmen.

Im Bereich der Natursteinkonservierung wird häufig versucht, aus den mittels Wassereindringprüfer nach Karsten bestimmten Wasseraufnahmen nach einer Korrekturrechnung zur Eliminierung des lateralen Transports einen Wasseraufnahmekoeffizienten zu berechnen [14–16], um die vor Ort gewonnenen Ergebnisse mit im Labor durchgeführten Laboruntersuchungen zu korrelieren. Für ein Verbundmauerwerk sind entsprechende Korrekturen aufgrund der unterschiedlichen Einflüsse von Fugenmörtel und Ziegeln hinsichtlich des lateralen Transports nicht auf einfache Weise möglich.

Tab. 5: Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten w über Sichtfläche und Querschnittsfläche sowie maximale Wasseraufnahme bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck von Ausbauziegeln der Grundschule Norderney sowie von Ersatzziegelmaterialien (Anzahl der Einzelmessungen in Klammern, Fehlerangaben bei Wiederholungsmessungen sind mittlere Abweichungen).

Probe	$w / \text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1/2}$				max. WA / M. %
	Sichtfläche		Querschnitt		
<i>Ausbauziegel</i>					
– ohne Brennhaut (rückgewittert)					
Probe 1	4.3	(1)	13.3	(1)	13.9 ± 0.2 (2)
Probe 2	17.8	(1)	19.3	(1)	12.8 ± 1.8 (2)
Probe 3	11.4	(1)	12.7	(1)	14.1 ± 0.1 (2)
– mit Brennhaut					
beschädigt (Probe 4)	4.1	(1)	5.1	(1)	9.8 ± 0.2 (2)
kaum beschädigt (Pr. 5)	7.7	(1)	9.4	(1)	11.2 ± 0.7 (2)
<i>Austauschziegel</i>					
Wehrmann	3.9 ± 0.2	(2)	5.6 ± 0.4	(2)	7.3 ± 0.2 (9)
Glindow	9.1 ± 1.5	(2)	–		9.4

Um den Einfluss des lateralen Transports im Ziegel zu überprüfen, wurde der Versuch unternommen, mit den Messwerten aus der w -Wert-Bestimmung die Wasseraufnahmen mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten, in diesem Fall der kleinen Karsten-Platte (vgl. Abb. 5a, S. 5), zu kalibrieren und empirisch die laterale Transportkomponente hinsichtlich ihrer Größenordnung zu erfassen. Dafür musste die zeitliche Auflösung der Messungen zur kapillaren Wasseraufnahme insbesondere während der ersten halben Stunde möglichst an die Ableseintervalle der Messungen mit der Karsten-Platte angepasst werden. Entsprechend aufbereitete, d.h. auf die Querschnittsfläche der kleinen Karsten-Platte (Durchmesser 4 cm) umgerechnete Rohdaten der Messungen zur Bestimmung des w -Wertes (20°C, 50% r.F.) wurden mit den tatsächlichen Messwerten verglichen, die mit der kleinen Karsten-Platte aufgenommen wurden.

Die beschriebenen Messungen wurden mit den Ausbauziegeln (Proben 1–5, Tab. 5) durchgeführt, wobei die kleine Karsten-Platte jeweils mittig sowohl auf der Sichtfläche als auch auf der frisch geschnittenen Querschnittsfläche befestigt wurde. Aufgrund der zusätzlichen lateralen Transportkomponente wurde erwartet, dass die mit der Karsten-Platte ermittelten Wasseraufnahmen in allen Fällen größer sein sollten als die aus den w -Werten berechneten. Diese Annahme wurde bei allen Messungen auf der frisch gesägten Querschnittsfläche bestätigt. Bei den Messungen auf der Sichtseite der Ausbauziegel ergaben sich jedoch unterschiedliche Ergebnisse. In Abb. 14a sind beispielhaft zwei Messungen dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Ausbauziegel mit teilweise beschädigter Brennhaut (Probe 4, Tab. 5). Während die mit der Karsten-Platte bestimmte Wasseraufnahme über die Schnittfläche größer ist als die aus dem w -Wert berechnete Aufnahme, liegen bei den Messungen auf der Sichtfläche umgekehrte Ver-

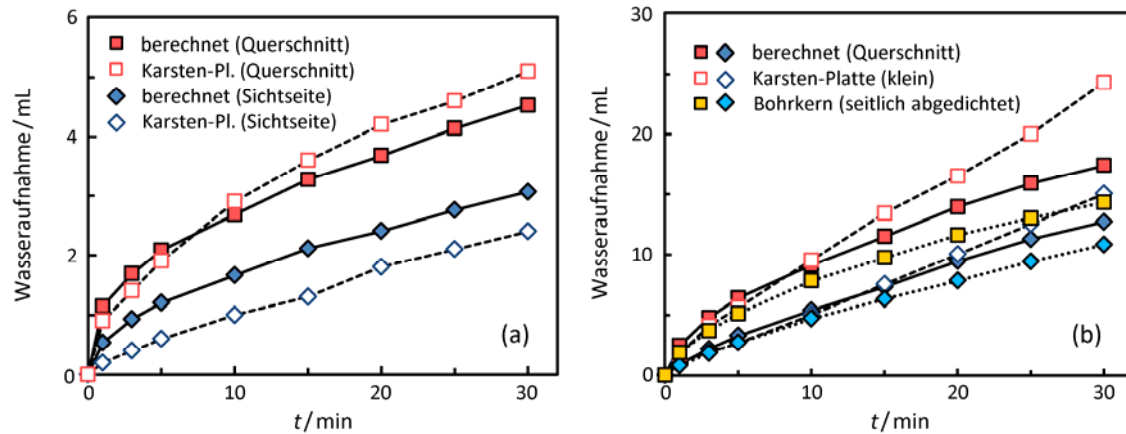


Abb. 14: Vergleich von Messungen mit der kleinen Karsten-Platte (gestrichelt) und den aus w -Werten berechneten Wasseraufnahmen (durchgezogene Linien) von Ausbauziegeln über die Sichtfläche (blaue Rauten) und den Querschnitt (rote Quadrate). (a): Probe 4 (vgl. Tab. 5); (b) Probe 2 (die am flankenversiegelten Bohrkern mit der Karsten-Platte bestimmte Wasseraufnahme ist gepunktet dargestellt).

hältnisse vor. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die aufgrund des unterschiedlichen Verwitterungszustandes recht heterogene Beschaffenheit der Sichtflächen der Ausbauziegel zurückzuführen.

Eine Kalibrierung wäre also nur über Bohrkern mit identischer Oberfläche wie die Saugfläche der Karsten-Platte möglich. Entsprechende Messungen wurden mit Probe 2 (vgl. Tab. 5) durchgeführt und sind in Abb. 14b dargestellt. Gegenübergestellt sind zunächst die Wasseraufnahmen, die in der beschriebenen Weise aus den w -Werten berechnet wurden (durchgezogene Linie), und die mit der kleinen Karsten-Platte gemessenen Wasseraufnahmen (gestrichelt). Es ist erkennbar, dass in diesem Fall nicht nur auf der Querschnittsfläche (Quadrate) sondern auch auf der Sichtseite (Rauten) mit der Karsten-Platte eine größere Wasseraufnahme aufgrund des lateralen Transports beobachtet wurde. Schließlich wurden aus den Ziegeln Bohrkern mit dem gleichen Querschnitt wie die Saugfläche der Karsten-Platte gebohrt und seitlich abgedichtet. An den beiden Bohrkernen wurde erneut die Wasseraufnahme mit der Karsten-Platte bestimmt, die nun den tatsächlichen eindimensionalen Transport beschreibt. Der Vergleich der gepunkteten und der gestrichelten Kurven liefert also ein Maß für zusätzliche Wasseraufnahme durch lateralen Transport bei Karsten-Messungen. Prinzipiell wäre auf diese Weise eine Kalibrierung möglich, allerdings ist der praktische Aufwand für Untersuchungen am Objekt nicht zu rechtfertigen, weshalb darauf verzichtet wurde.

Weitere Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme widmeten sich der Frage eines möglichen Einflusses des Winddrucks auf die kapillare Wasseraufnahme. Bei Verwendung der Franke-Platte kann der Einfluss des Winddrucks durch unterschiedliche Füllhöhen des Füllrohres über eine Variation des Drucks der Wassersäule simuliert werden. Die Wasseraufnahme eines homogenen Ziegelmaterials mit Porenradialen im kapillaren Saugbereich sollte allerdings aufgrund des fehlenden Einflusses von Fugen mit möglichen Flankenabrissen alleine durch das kapillare Saugen bestimmt und deshalb unabhängig vom Winddruck sein. Dies konnte für die Ausbauziegel der Grund-

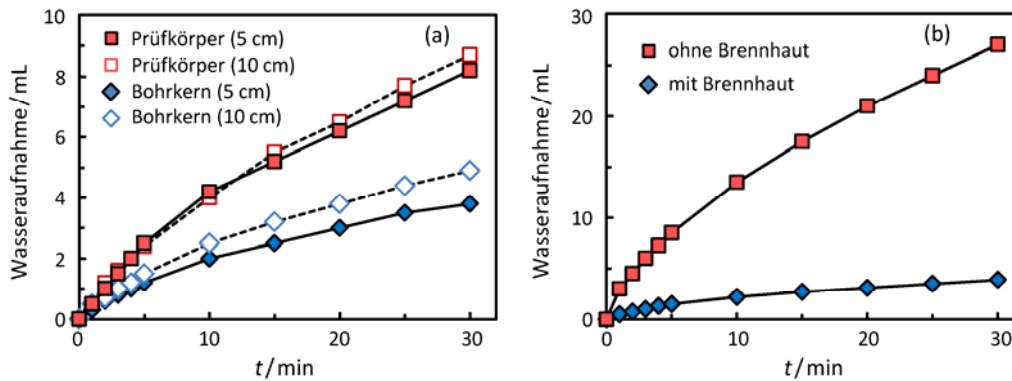


Abb. 15: (a) Mit der großen Karsten-Platte bei unterschiedlichen (konstanten) Füllständen bestimmte Wasseraufnahme des Verbundprüfkörpers sowie des daraus entnommenen Bohrkerns (s. Abb. 13c und d); (b) Vergleich der Wasseraufnahme der Sichtfläche des gleichen Bohrkerns nach Abschleifen von Brennhaut und Zementleimschicht.

schule in einer Messserie mit zwei unterschiedlichen Füllhöhen bestätigt werden. Es wurden insgesamt 20 Messungen mit der kleinen Karsten-Platte auf verschiedenen Ausbau- und Austauschziegeln (mit und ohne Brennhaut) durchgeführt, bei denen jeweils mit Füllhöhen von 50 mm und 100 mm (von der Plattenmitte gemessen) gearbeitet wurde. Bei diesen Messungen wurde erwartungsgemäß im Rahmen der Messgenauigkeit keinerlei Einfluss der Füllhöhe beobachtet.

Eine leichte Abhängigkeit der Wasseraufnahme von der Füllhöhe, d.h. dem Winddruck, bei Messungen mit der großen Karsten-Platte (10 cm Durchmesser, vgl. Abb. 5b, S. 13) auf dem Sandwichprüfkörper (Abb. 13c und d) sowie einem daraus gewonnenen Bohrkern (Abb. 15a). Bei erstgenanntem Prüfkörper ist noch ein Lateraltransport möglich, bei dem Bohrkern hingegen, der den gleichen Durchmesser besitzt wie die große Karsten-Platte (10 cm) nicht. Dennoch ist festzustellen, dass trotz identischer Saugflächen der großen Karsten-Platte und des flankenversiegelten Bohrkerns kein vollständig linearer Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und $t^{-1/2}$ besteht. Der Kurvenverlauf entspricht Messkurven, üblicherweise bei Messungen am Bauwerk vorgefunden werden. Die insgesamt geringe Wasseraufnahmerate spricht für einen sehr guten Verbund zwischen Ziegel und Mörtel, wie er am Bauwerk allerdings kaum vorliegen dürfte. Dennoch steht zu vermuten, dass entlang der Grenzfläche bereits sogenannte Blattkapillaren und teilweise wohl auch Durchströmungsporen entstanden sein, die für die allerdings recht geringfügige Druckabhängigkeit der Wasseraufnahme sorgen.

In einem weiteren Versuch wurden an dem bereits erwähnten Bohrkern die Brennhaut sowie die bei der Herstellung des Verbundkörpers gebildete Zementleimschicht durch Abschleifen entfernt, um den Einfluss einer Rückwitterung der Oberfläche zu simulieren. Anschließend wurde erneut die Wasseraufnahme bestimmt, das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 15b dargestellt. Durch die Entfernung von Brennhaut und Zementleim steigt die Wasseraufnahme sehr stark an.

Mit den zuletzt beschriebenen Verbundprüfkörpern wurden auch Messungen zur Bestimmung des w -Wertes sowie des Trocknungsverhaltens durchgeführt. Ein Ver-

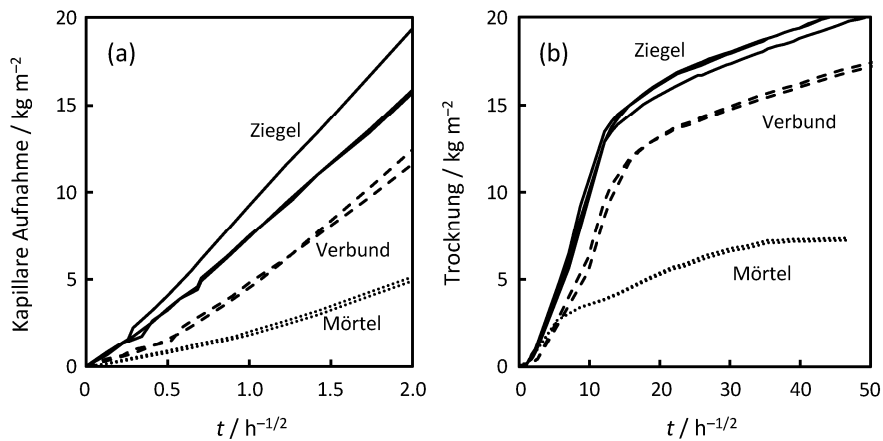


Abb. 16: Kapillare Wasseraufnahme (a) und Wasserabgabe bei der Trocknung (b) von Ziegel- (Linien), Mörtel- (gepunktet) und Verbundprüfkörpern (gestrichelt).

gleich der Wasseraufnahmemessungen durch kapillares Saugen an Ziegeln aus Glin-dow, den Mörtelprüfkörpern sowie den genannten Ziegel–Mörtel-Verbundkörpern ist in Abb. 16a dargestellt. Die Ziegel weisen deutlich höhere Wasseraufnahmekoeffizienten auf ($9.1 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1/2}$, vgl. Tab. 5) als die hier untersuchten Mörtelprüfkörper mit einem Aufnahmekoeffizienten von $2.6 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1/2}$. Die Wasseraufnahme der Verbundkörper liegt mit einem w -Wert von $7.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1/2}$ erwartungsgemäß zwischen derjenigen der beiden reinen Materialien, ähnelt aber aufgrund des höheren Anteils der Ziegeloberfläche an der gesamten Saugfläche eher dem Verhalten der Ziegel. Das überraschend geringe Saugvermögen der Mörtelprüfkörper ist die Folge davon, dass sie unter optimalen Bedingungen im Labor hergestellt wurden. Am Objekt erfolgt der Mörtel einbau üblicherweise erdfeucht, so dass diese Mörtel ganz andere Eigenschaften aufweisen. Die an den Laborprüfkörpern ermittelten geringen Wasseraufnahmen sind unter Bauwerksbedingungen deshalb nicht erreichbar. Dies bestätigen auch die Untersuchungen zur Wasseraufnahme an der Grundschule auf Norderney (vgl. Kap. 4.2.6).

Die gleichen Prüfkörper, die bei den Wasseraufnahmemessungen verwendet wurden, wurden auch für die Untersuchung des Trocknungsverhaltens eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde nach kapillarer Sättigung jeweils eine weitere Oberfläche der Prüfkörper mit Folie abgedichtet, so dass die Verdunstung nur noch über eine Stirnfläche erfolgen könnte. Diese wurde kurz abgetupft, um überstehendes Wasser aufzunehmen und die Trocknung wurde gravimetrisch verfolgt. Zwischen den Wägungen waren die Prüfkörper der Laboratmosphäre ausgesetzt, deren Temperatur und Luftfeuchtigkeit kontinuierlich aufgezeichnet wurde. Die Ergebnisse der Trocknungsmessungen sind in Abb. 16b dargestellt. Bei allen Materialien können eindeutig beide Trocknungsphasen unterschieden werden. Die Trocknungsgeschwindigkeiten entsprechen dem Verhalten bei der kapillaren Wasseraufnahme. Der Ziegel nimmt also nicht nur am meisten Wasser beim kapillaren Saugen auf, er trocknet auch am schnellsten wieder aus. Umgekehrt haben die Mörtelprüfkörper deutlich kleinere Wasseraufnahmekoeffizienten, trocknen aber auch langsamer. Wie bei den kapillaren Saugversuchen ähnelt auch bei der Trocknung das Verhalten der Verbundprüfkörper eher dem Verhalten der Ziegel, was auf-

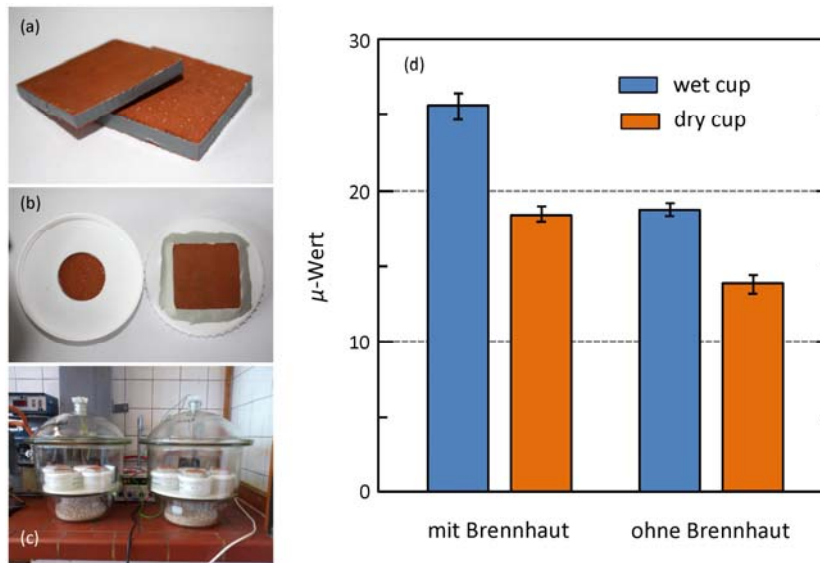


Abb. 17: Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Austauschziegel aus Glindow. (a) Ziegelscheiben, (b) Befestigung auf der Kunststoffdose, (c) Dosen („cups“) im Exsikkator mit Trockenmittel (Dry-cup), (d) Wasserdampf-Diffusionswiderstand.

grund des großen Ziegelanteils der Oberfläche plausibel ist. Bei allen Prüfkörpern verläuft die Trocknung wesentlich langsamer als die kapillare Wasseraufnahme. Dies gilt auch für die erste Trocknungsphase, in der die Trocknungsrate um nahezu eine Größenordnung langsamer verläuft als die kapillare Wasseraufnahme. Während der zweiten Trocknungsphase verläuft die Trocknung noch einmal deutlich langsamer.

Die Untersuchung der Wasserdampfdurchlässigkeit des Ziegelmaterials erfolgte in Anlehnung an Knöfel und Schubert [32] sowie an DIN 52617 und DIN EN ISO 12572 [31] sowohl nach dem Dry-Cup- als auch nach dem Wet-Cup-Verfahren. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 17 dargestellt. Die Messungen erfolgten mit 3–5 mm dicken Scheiben ($50 \times 50 \text{ mm}^2$) von Austauschziegeln aus der Ziegelei Glindow, die auf dem Deckel einer Kunststoffdose mit einem Dichtungsmaterial (Terostat IX) dampfdicht befestigt wurden.

Im Deckel, unter den Ziegelscheiben befindet sich eine kreisförmige Öffnung mit einem Durchmesser von 40 mm. Es wurden mit Probekörpern Messungen durchgeführt, von denen drei Ziegelscheiben so geschnitten wurden, dass die Brennhaut erhalten war und der Wasserdampftransport durch die Brennhaut untersucht werden konnte.

Zur Erzeugung eines Luftfeuchtigkeitsgradienten wurden reines Wasser (ca. 100% r.F.) und ein Trockenmittel (Zeolith 13X, < 10% r.F.) jeweils in Verbindung mit einer gesättigten Magnesiumnitrat-Lösung (54% r.F. bei 20 °C) verwendet. Für die Messungen nach dem Dry-Cup-Verfahren wurden also im Luftfeuchtigkeitsgradienten 54%–0% r.F. durchgeführt, die Wasserdampfdurchlässigkeit nach dem Wet-Cup-Verfahren wurde bei Feuchtegradienten 100%–54% r.F. gemessen. Die auf diese Weise bestimmten Wasserdampf-Diffusionswiderstände μ sind in Abb. 17d dargestellt. Das untersuchte Ziegelma-

terial weist demnach recht hohe μ -Werte von ca. 14–26 auf, wobei erwartungsgemäß bei Transport von Wasserdampf durch die Brennhaut ein höherer Diffusionswiderstand zu überwinden ist.

Prinzipiell ist es durch Labormessungen der beschriebenen Art möglich, die wesentlichen feuchtetechnischen Parameter von Verbundmauerwerk experimentell zu bestimmen. Für die korrekte Bestimmung aussagekräftiger w -Werte von Verbundmauerwerk müssen die Messungen mit entsprechenden Verbundkörpern durchgeführt werden. Eine vereinfachte Messung mit Hilfe des Wassereindringprüfers nach Karsten liefert aufgrund der Probleme mit lateralem Transport keine Absorptionskoeffizienten und es ist nicht auf einfache Weise möglich, das Messverfahren zu kalibrieren und somit zu korrigieren. Ein gangbarer Weg ist hier sicherlich die Verwendung von Modellen [1,2], wenn die für die Modelle erforderlichen Kenndaten von Ziegel und Fugenmörtel bekannt sind.

Ein schwerwiegenderes Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass die für Labormessungen herangezogenen Verbundprüfkörper in der Regel unrealistische Prüfkörper sind, da sie unter idealen Bedingungen hergestellt werden und viel bessere Eigenschaften aufweisen als das Mauerwerk an einem Objekt, selbst wenn es sich um eine frisch angelegte Musterfläche handelt. Die Hauptursache liegt in den ungleich schwierigeren Bedingungen, unter denen Mörtel am Objekt eingebracht und abbinden müssen (vgl. auch Kap. 4.2). Im Ergebnis bedeutet das, dass es prinzipiell aussichtsreicher ist, feuchtetechnische Messungen nicht im Labor sondern vor allem am Objekt selbst erfolgen sollten. Den in Kap. 2.1 und 1 vorgestellten Messverfahren, also der Franke-Platte, dem modifizierten Wassereindringprüfer nach Karsten mit größerem Querschnitt zur Verwendung bei Verbundmauerwerk sowie das in diesem Vorhaben entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Trocknung von Verbundmauerwerk kommt dabei eine wesentliche Bedeutung zu. Insbesondere Messungen mit Franke- oder modifizierter Karsten-Platte sind recht durchführbar und deshalb unverzichtbar. Die Verwendung der Kammermethode ist deutlich aufwendiger und es ist im Einzelfall zu prüfen, ob der Aufwand zu rechtfertigen. Grundsätzlich zu warnen ist davor, sich alleine auf Modellrechnungen in Verbindung mit Labormessungen zu verlassen. Der Zustand des Fugenetzes und die Anbindung an die Ziegel müssen vor Ort durch experimentelle Untersuchungen ermittelt werden. Möglicherweise, das müssen zukünftige systematischere Untersuchungen noch bestätigen, können durch systematische Variation der Füllhöhe bei Messungen mit der Franke- bzw. der Karsten-Platte zuverlässige orientierende Aussagen über den Zustand der Ziegel-Mörtel-Grenzfläche zerstörungsfrei getroffen werden.

4 Objektuntersuchungen

4.1 Objektauswahl

<Die Wahl geeigneter Objekte für die geplanten Objektuntersuchungen fiel aus mehreren Gründen auf zwei Bauwerke auf der Insel Norderney. Neben der kulturhistorischen Bedeutung der beiden unter Denkmalschutz stehenden Objekte spielte eine entscheidende Rolle, dass sich die beiden Ziegelobjekte hinsichtlich der Mauersteine sehr stark voneinander unterscheiden. Die an der Grundschule verwendeten Ziegel besitzen einen wasserzugänglichen Porenraum, so dass der Transport von Feuchtigkeit im Mauerwerk sowohl in den Fugen als auch in den Ziegeln erfolgt. Demgegenüber verfügen die am Wasserturm verbauten Hartbrandklinker über nahezu keine Porosität, so dass letztlich der Wassertransport nur über die Fugen oder die Grenzflächen des Verbundes Ziegel-Mörtel. Neben dem kapillaren Saugen besteht an beiden Bauwerken natürlich auch die Möglichkeit des Wassereintrittes in das Mauerwerk über Risse und Fehlstellen. Beide Bauwerke sind zudem den gleichen, sehr starken klimatischen Beanspruchungen durch das Seeklima ausgesetzt. Zu erwähnen sind eine hohe Schlagregenbeanspruchung und der jahrzehntelanger Eintrag von Seesalz. Schließlich wurden an beiden Objekten bereits Voruntersuchungen durch einen der Projektpartner durchgeführt [38,39], auf deren Grundlage die Weiterentwicklung eines integralen Untersuchungskonzeptes möglich war, ohne alle erforderlichen maßnahmenorientierten Untersuchungen zusätzlich im Rahmen des Forschungsvorhabens durchführen zu müssen. Es mussten lediglich sinnvolle Ergänzungen und Vertiefungen vorgenommen werden.

4.2 Grundschule Norderney

4.2.1 Historie

Die Grundschule auf Norderney stellt neben der Hochtiedsstuv, dem Wasserturm, dem Leuchtturm und dem Kap eines der markanten Denkmäler der Insel in Ziegelbauweise dar und hat inzwischen ein Alter von mehr als 100 Jahren erreicht (Abb. 18). Im Jahr 1898 schrieb die Schuldeputation auf Norderney einen Architektenwettbewerb deutschlandweit für den Entwurf einer zentralen Schulhausanlage aus. Zuvor wurden die Norderneyer Kinder vom Pastor unterrichtet. Erst seit 1889 gab es eine gewerbliche Fortbildungsschule für die Fischer, deren Existenz durch die Dampfschiffahrt zunehmend bedroht wurde.

Den ersten Preis des Architektenwettbewerbs gewann der Hamburger Architekt J. Grotjan mit seinem Entwurf „Sonnenseite“. Nach seiner Fertigstellung am 5. Oktober 1900 wird das Zentralschulgebäude übergeben. Bereits 1919 verzeichnete Hauschronik eine Anzahl von 509 Schülern.

Die mit ihrem Haupteingang zur Jann-Berghaus-Straße orientierte Schulanlage bestand aus einem westlichen Mittelschultrakt und einem längeren östlichen Volksschulflügel, die durch eine Querachse mit Dachreiter zur Betonung der Mittelachse verbunden sind. Abb. 18a vermittelt einen Eindruck von dem Schulgebäude von der Jann-Berghaus-



Abb. 18: Grundschule Norderney. (a) Nordansicht der Grundschule von der Jann-Berg-haus-Straße aus. Erkennbar sind die beiden Klassentrakte mit dem Verbindungsgang und dem markanten Dachreiter und Schuluhr; (b) Blick von Südwesten auf den Grundschul-komplex; (c) Übersicht über die Südostseite des östlichen Gebäudetraktes.

Straße aus mit dem Verbindungstrakt zwischen West- und Ostflügel und noch vorhandenem altem Dachreiter sowie der Uhr. Aus südwestlicher Blickrichtung (Abb. 18b) ist der kurze Westtrakt (linke Bildseite), die gesamte Südseite sowie die Westseite des längeren Ostflügels (rechte Bildseite) des dreigeschossigen Bauwerks erkennbar. Die Süd- und Ostseite des Ostflügels gibt Abb. 18c in der Übersicht wieder. Spiegelbildlich zur Westseite ist analog am Gebäudeende der Zugang zum Dachboden konstruktiv durch einen Erker abgesetzt.

Das Schulgebäude besitzt lediglich einen Kriechkeller und ist auf Stützen und einem Streifenfundament auf Sandboden gegründet, wobei letztgenanntes aus Ziegeln besteht. Die als Baumaterial verwendeten Ziegel stammen genauso wie die mineralischen Bindemittel der Mörtel vom Festland, während als Zuschlag für den Fugen- und Mauermörtel Dünensand eingesetzt wurde. Aufgrund der starken klimatischen Beanspruchung besitzt das Schulgebäude in Teilbereichen ein Luftschichtmauerwerk, wobei die Luftschicht nach den Bauplänen weit innen liegt. Innenseitig besteht das Mauerwerk hinter der Luftschicht nur noch aus einer halben Ziegellage (12 cm). Das für die Decken tragende Mauerwerk bildet also die Außenschale, in die die Träger der Schürmann'schen Steineisendecken einbinden und am Kopf mit einem Riegel versehen sind. Im Bereich der Fenster und Gebäudeecken findet sich keine Luftschicht. Anscheinend ist auch nicht überall, wo in den bauzeitlichen Mauerwerksquerschnitten eine Luftschicht verzeichnet ist, auch tatsächlich eine vorhanden.

4.2.2 Schadensbeschreibung

Die sichtbaren Schäden lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Bei der ersten handelt es sich um Risse im Mauerwerk, die unmittelbar mit der Konstruktion des Gebäudes zusammenhängen und auf eine Korrosion der Eisenträger zurückgehen. Diese sind von Materialschäden in der Oberflächenebene des Gebäudes zu unterscheiden, die eng mit dem Feuchte- und Salzeintrag aus der Seeluft verbunden sind. Zusätzlich erfolgte in der Vergangenheit auch ein Schwefeldioxideintrag aus der Atmosphäre, der aus den Emissionen des Hausbrandes von der Insel selbst und der Industrie des Festlandes bestand.

Abb. 19a vermittelt einen Eindruck von dem augenscheinlich intakten Mauerwerk auf der Ostseite. Die Ziegel weisen auf der Oberfläche partiell Schwärzungen auf und Kratzer in der Brennhaut, die Kinder mit harten spitzen Gegenständen verursacht haben, da sich dieser Bereich im unteren Teil des Erdgeschosses befindet. In anderen Bereichen der Ostwand findet sich noch der Abdruck des Fugeisens an der Fugenoberfläche.

Charakteristisches Schadensbild an den Ziegeln stellt der Brennhautverlust durch Schalenbildung dar, verbunden mit einer beginnenden Gefügelockerung unter dem Schalenrand, für die Abb. 19b ein typisches Beispiel bildet. Es handelt sich dabei um das Initialstadium des Schadensprozesses. Nach dem sukzessive ablaufenden Verlust der Brennhaut in Quadratmillimeter bis Quadratzentimeter großen Plättchen oder als fast flächendeckende Schale, wie im Beispiel eines Sturzes auf der Westseite in Abb. 19c, erfolgt die Rückwitterung der darunter befindlichen aufgelockerten Zone. Auf diese Weise ergibt sich abhängig von der Brenntemperatur der Ziegel ein Wechsel von intakten Sichtflächen bis hin zu mehrere Millimeter zurückgewitterten Oberflächen, mit allen möglichen Übergängen. Grob lässt sich eine Unterscheidung anhand der Ziegelfarbe treffen. Die helleren, mehr orangefarbenen Ziegel waren niedrigeren Brenntemperaturen ausgesetzt als die dunkleren, roten Ziegel. Dies lässt sich an Abb. 19d nachvollziehen, die in der Bildmitte stärker zurückgewitterte Ziegel in leicht hellerem Farbton im Vergleich zu geringfügig dunkleren in der unteren Bildhälfte mit geringerem Schädigungsgrad zeigt. Fehlt die Brennhaut nehmen die Ziegel das Regenwasser sehr viel besser auf, während das Wasser ansonsten über die Brennhaut noch weitgehend abläuft, wie es der



Abb. 19: Augenscheinlich intaktes Ziegelmauerwerk (a) auf der Ostseite (unterer Bereich des Erdgeschosses) und typische Schäden im Ziegelmauerwerk: (b) typische Schalenbildung auf den Ziegeln mit sukzessiver kleinteiliger Ablösung (Südseite, Osttrakt); (c) großflächigere Schalenbildung auf Ziegeln eines Fenstersturzes (Westseite); (d) rückgewitterte Ziegeloberflächen nachdem Verlust der Brennhaut als Schale (Westseite); (e) deutlich sichtbarer Unterschied in den Saugfähigkeiten der Ziegel mit und ohne Brennhaut (Nordseite, Osttrakt, Aufnahme erfolgte unmittelbar nach einem starken Regenschauer).

Nordgiebel des Osttraktes in Abb. 19e unmittelbar nach einem starken Regenschauer bestätigt.

Der Verwitterungsfortschritt der Ziegel geht mit einer Zerstörung des Fugenmörtels einher. Dabei kann der Materialverlust auf den Ziegel noch größer sein als in Abb. 20a und bis zu einer Tiefe von 2 cm reichen, wie an den Nordgiebeln an einzelnen Ziegeln gemessen wurde. Neben dem kompletten Verlust des originalen Fugenmörtels weist der bei größerem Betrachtungsabstand zunächst intakt erscheinende Fugenmörtel häufig intern Risse oder Fugenflankenabriss auf, sofern man den Betrachtungsabstand verrin-

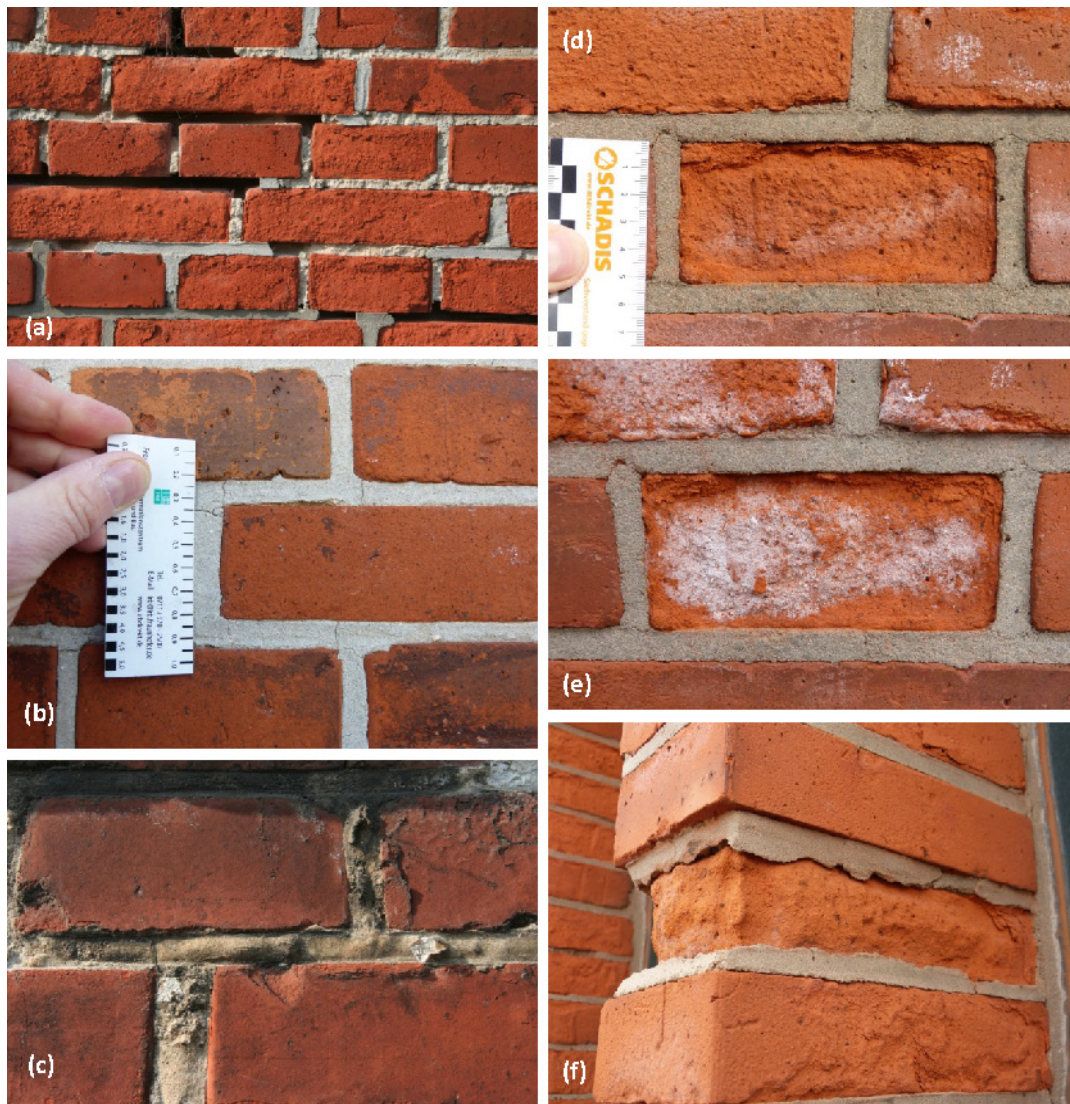


Abb. 20: Zustand der Fugen und des Ziegel-Mörtel-Verbundes. (a) Fugenmörtelschäden, unregelmäßiges Absanden des originalen Fugenmörtels bis hin zum völligen Fugenmörtelverlust einhergehend mit Schädigung der Ziegel (Südseite, Osttrakt); (b) Rissbildungen im originalen Fugenmörtel und entlang der Fugenflanken (Westseite, Westtrakt); (c) Blasenbildung durch Gipswachstum in der Oberflächenzone des originalen Fugenmörtels (Südseite, Osttrakt); (d) Rückwitterung durch Abschuppen bis Absanden eines Kopfsteins der von Ersatzfugenmörtel eingerahmt wird im April (Westseite, Westtrakt); (e) Zustand des gleichen Kopfsteins im Juli mit starken Salzausblühungen; (f) Ausbesserung mit Ersatzfugenmörtel im Bereich geschädigter Ziegel ohne Ziegelaustausch oder Ergänzung mit Ziegeleratzmassen, Ziegelzerfall dauert an und greift unter den Fugenmörtel (Westseite, Westtrakt).

gert (Abb. 20b). Auf der Südseite des Osttraktes wurden auch beulenartige Aufwölbungen und Blasen an der Altmörteloberfläche, für die Abb. 20c ein prägnantes Beispiel bildet, nachgewiesen. Es handelt sich dabei um Vergipsungen der Oberflächenzone, die sich vom Untergrund gelöst haben und nach dem Aufplatzen eine Lockerzone freigeben.

Auf der Westseite und auf Teilen der Südseite erfolgte im unteren Bereich bereits großflächig ein Fugenmörtelaustausch, mit einem harten, etwas gröber erscheinenden Mate-

rial, welcher für das Mauerwerk nicht geeignet war. Aufgrund seines Gefüges und seiner Festigkeit wittert dieser Mörtel an der Oberfläche kaum zurück, die angrenzenden Ziegel umso stärker, je weicher sie sind. Der Fugenmörtel bleibt quasi als Rahmen um den zurückgewitterten Ziegel erhalten, wie Abb. 20d aus dem Frühjahr 2013 zeigt. In der Abb. 20e, die aus dem Sommer 2013 stammt, sind starke Salzausblühungen sichtbar, so dass die zyklische Salzkristallisation als maßgeblicher Schadensursache bestätigt wird.

Als der Ersatzmörtel appliziert wurde, lagen in Teilbereichen des Mauerwerks bereits Ziegelschäden vor. Bei rückgewitterten Oberflächen erfolgte kein Ziegelaustausch oder auch keine Antragung von Ziegeleratzmasse, stattdessen wurde der Fugenmörtel wie in Abb. 20f lediglich auf die Ziegelrandzone gezogen und mit dem Fugeisen geglättet. Inzwischen witterte der Ziegel weiter zurück und der Fugenmörtel liegt aufgrund des Materialverlustes am Rand hohl. Auch wenn an diesem Beispiel bereits eine starke Vorschädigung vorlag, so hat sich an vielen Stellen, in denen ein Fugenmörtelaustausch erfolgte, der Schadensfortschritt beschleunigt.

An lokalen Feuchtequellen, wie dem defekten Regenfallrohr in Abb. 21a, werden die Salze durch die sich lateral im Mauerwerk ausbreitende Feuchtigkeit immer wieder mobilisiert und führen zu Schäden (Abb. 21b), was im Rahmen der geplanten Maßnahme behoben wird.

In Fensteröffnungen wurden die Sohlbänke aus dunkelroten Hartbrandklinkern gebaut, die mit stark zementhaltigem Mörtel verfügt wurden. Allerdings belegt Abb. 21c, dass der Fugenmörtel Fehlstellen und Flankenabriss aufweist. Dadurch kann Wasser von oben in das Mauerwerk darunter eindringen, trägt selbst gelöste Salze mit ein und mobilisiert im Mauerwerk vorhandene Salze, die in längeren Trockenperioden an der Ziegeloberfläche oder der Oberflächenzone des Mauerwerks unmittelbar unter der Sohlbank kristallisieren. Zudem sind die Abdichtungen der Fenster rissig, so dass auf diese Weise Wasser nach innen eindringen kann und in den Leibungen den Gipsspachtel unter der Beschichtung löst, der an anderer Stelle wieder rekristallisiert und so die Farbe zerstört. Auch die Fensterbänke aus sogenanntem „Juramarmor“, bei dem es sich tatsächlich um sedimentäres Kalkgestein handelt, werden durch den Feuchte- und Salzeintrag zerstört (Abb. 21d). Der Feuchtetransport wird im Fensterbereich nicht durch eine Luftschicht unterbrochen.

In anderen Bauteilen, in die gemäß Planung auch keine Luftschicht eingebaut werden sollte, kann die mit Salzen befrachtete Feuchtigkeit über die Mörtel- und Ziegelporen direkt bis nach innen wandern. Dies soll am Beispiel des Treppenturmes erläutert werden, der außen als Erker ausgebildet ist, welcher mit einer Wendeltreppe auf den Dachboden führt. Obgleich das Treppenhaus eine Stahltür vom Haupttreppenhaus trennt, ist häufig ein Luftzug von unten in Richtung Dachboden feststellbar. Regnet es und bleibt danach die relative Außenluftfeuchte hoch, so trocknet die Wand nach innen ab. Der in der Übersichtsaufnahme Abb. 22a noch am Rand sichtbare, ursprünglich vorhandene Kalkputz mit Besenstrichoberfläche ist durch die zyklisch sich wiederholende Kristallisation leicht löslicher Salze bereits an großen Teilen der Innenseite der Außenwand abgefallen. Sogar der Mauermörtel ist bis in mehrere Zentimeter Tiefe nahezu pulveri-



Abb. 21: Mauerwerksdurchfeuchtung und Salztransport. (a) lokale Mauerwerksdurchfeuchtung durch defektes Regenfallrohr (Südseite, Gebäudemitte); (b) Ziegelzerstörung durch leichtlösliche Salze in der Trocknungszone der lokalen Feuchtequelle (Ausschnitt aus a); (c) vornehmlich in den Sommermonaten erfolgt die Kristallisation der durch Feuchte mobilisierten Salze, die über defekte Fugen der Sohlbänke in das darunter liegende Mauerwerk eindringen konnte; (d) durch von außen über defekte Abdichtungen an den Fensterrahmen eindringende Feuchtigkeit führt zusammen mit Salzen zu Schäden an den Fensterbänken aus Jurakalk (Klassenraum Westseite).

siert. Die Ziegel weisen Zerstörungen durch Schalenbildungen und tiefgründiges Abschuppen auf, nachdem die Schale abgefallen war (Abb. 22b). Dieses Wendeltreppenhaus wurde bis zur Neueindeckung des Daches über einen Zeitraum von ca. 20 Jahren nicht benutzt. Die Begehung des Dachbodens erfolgte immer von dem gleichartigen Treppenhaus auf der Ostseite, in welchen das Schadensausmaß sehr viel geringer ist. In diesem Zeitraum sammelte sich das von der Wand abgefallene Material auf den Treppenstufen, von denen die unmittelbar an der Außenwand angrenzenden Stufen mehr als 1 kg Bauschutt aufwiesen (Abb. 22c).

Begünstigt wurde diese Art des Schadensprozesses nicht nur durch das Fehlen der Luftschicht, sondern auch durch die Abnahme der Wanddicke mit der Höhe, also von



Abb. 22: Schäden am Treppenturm durch Salze und Frostschäden. (a) Wendeltreppenaufgang zum Dachboden (Westseite innen): der ursprüngliche Putz ist durch Feuchte- und Salztransport von außen und Kristallisation der Salze an der Grenzfläche zwischen Ziegelmauerwerk und Putz zerstört worden; (b) Schädigung von Mauermörtel und Ziegeln durch Salzkristallisation nach dem Verlust des Putzes; (c) im Zeitraum von ca. 20 Jahren angereicherte Ablagerungen des Ziegel- und Fugenmörtelmaterialverlustes auf den Treppenstufen; (d) scherbiger Ziegelzerfall, wie er typisch für Frostsprennung ist (Westseite, Erker).

Stockwerk zu Stockwerk. Aus diesem Grund liegt ein vergleichbarer Schadensablauf an den Giebeln vor. Auf der Nordseite ist die Wirkung der Kristallisationszyklen zunächst etwas geringer, aber letztlich im Resultat langfristig gleich.

Demgegenüber sind Merkmale, die auf eine Frostschädigung hinweisen, sehr viel weniger ausgeprägt als die beschriebenen Salzs Schäden. Der für die Frostsprennung typische scherbige Bruch, den Abb. 22d als Beispiel an einem Ziegel im Rosettenkranz des Erkers zeigt, wurde fast ausschließlich auf der Westseite und dort an höher gelegenen, dem Regen stärker ausgesetzten Bauteilen festgestellt.

Die Intensität der sichtbaren Schäden der Gebäudehülle ist stark expositionsabhängig. Auf der Westseite, die die Schlagregenseite bildet, treten die meisten Schäden auf. Auf der Nord- und Südseite sind die Schäden auf bestimmte Mauerwerksabschnitte begrenzt, während das Mauerwerk auf der Ostseite die geringste Schadensintensität erkennen lässt. Abgesehen von dem unteren Bereich, direkt über den aus verwitterungs-resistenteren Ziegeln bestehendem Sockel, nimmt das Schadensausmaß nach oben zu.

Zusätzlich zu kleinen Rissen im Mörtel und auch in einzelnen Ziegeln treten in regelmäßigen vertikalen und horizontalen Abständen lange diagonale Risse auf, die treppenartig dem Fugenverlauf folgen. Häufig sind sie nicht als Riss, sondern als breite Fugenausbesserung mit unterschiedlichen Mörteln sichtbar. Ein typisches Beispiel gibt Abb. 23a wieder, in welchem mehrere Ausbesserungen anhand verschiedener Grautöne der Mörtel sichtbar sind, die zwar überwiegend dem Fugenverlauf folgen, aber auch randlich Ziegel durchziehen und teilweise wieder aufgerissen sind. Diese Risse werden durch korrodierende Deckenträger aus Eisen verursacht. Die Volumenvergrößerung des Trägers durch die Korrosionsprodukte hat sogar zu einem Aufreißen einer Fuge in der darüber liegenden Sohlbank sowie einer Anhebung beiderseits der Rissflanken geführt.

Diese Risse gehen von den in das Mauerwerk einbindenden Deckenträgern aus. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des Erkers auf der Westseite, der innen die Wendeltreppe beherbergt, da ein Deckenträger die Deckenöffnung zum Dachboden begrenzt und somit seine Einbindung in das Mauerwerk sichtbar ist. Auf der Außenseite ist erkennbar, dass die Risse über dem Fenster von einem zentralen Punkt ausgehen und von diesem mehr oder weniger diagonal entlang der Fugengrenzen verlaufen (Abb. 23b). Zum einen lässt sich aufgrund der breiteren Stoßfugen der Rissverlauf verfolgen, zum anderen belegen sie ein Auseinanderdrücken des Mauerwerks durch die Korrosion des einbindenden Eisenträgers, der in Abb. 23c in der oberen rechten Bildhälfte von der Innenseite dargestellt ist. Von dem Träger gehen zwei Risse zu den Ecken des Fenstersturzes aus. In diesem Bereich bildet der Träger die Begrenzung der Öffnung für die Wendeltreppe, so dass keine Sondierungsöffnung für die Klärung der Rissursache angelegt werden musste.

An dem Trägerkopf wurde ein Riegel angeietet, der das Verrutschen im Mauerwerk verhindern sollte, wie an dem in Abb. 23d dargestellten ausgebauten Trägerkopf zu erkennen ist. Von dem ehemaligen Doppel-T-Träger bzw. I-Träger ist nur noch eine Seite erhalten, die andere ist der starken Korrosion zum Opfer gefallen. Auch der Riegel besitzt auf der einen Seite eine dicke Ummantelung mit Korrosionsprodukten.

Bei dem heute feststellbaren Zusammenwirken von Korrosionsfortschritt infolge eindringenden Regenwassers mit darin gelösten Salzen und fortdauernder Zerstörung des Mauerwerks durch Rissbildung, stellt sich die Frage nach der Schadensursache. Erlaubten die Gefügeparameter des ungeschädigten Mauerwerks von vornherein, dass das Wasser mit dem darin gelösten Seesalz, welches von Baubeginn an auf die Baustoffe einwirkte, bereits bis zu den Trägerenden gelangen und den Korrosionsprozess auslösen konnte, oder gab es Bauteilbewegungen, die an den Trägerenden zu ersten Haarrissen im Mauerwerk führten, über die das Wasser samt Inhaltsstoffen die Korrosion auslösen konnte. Auch wenn diese Frage zu Beginn einer Schadensuntersuchung



Abb. 23: Schäden durch korrodierende Deckenträger aus Eisen. (a) massive Rissbildung im Ziegelmauerwerk, die mehrfach ausgebessert wurde, aber nicht nachhaltig und dauerhaft behoben werden konnte (Westseite, Ostrakt); (b) analoges Beispiel der Rissbildung über dem Erker mit dem Wendeltreppenzugang zum Dachboden auf der Westseite; (c) Ansicht der Rissbildung und der Korrosion des Trägers von innen (Wendeltreppenzugang zum Dachboden auf der Westseite); (d) abgeschnittener und ausgebauter, stark korrodierter Trägerkopf mit angenietetem Querriegel (Westseite, Ostrakt); (e) parallel zum Träger verlaufender Riss im Belag des Flurfußbodens (Innenbereich, Flur); (f) Bestätigung der Ursache des Trägers als Ursache des Risses durch Sondierungsöffnung (innen).

nicht abschließend geklärt werden kann, manchmal auch nicht nach Durchführung und Auswertung aller Ergebnisse, so fallen doch Bauteilbewegungen anhand einiger markanter Risse und Verkippungen des Plattenbelages in den Fluren der Schule auf, welche die gleiche Orientierung wie die Träger besitzen. Abb. 23e zeigt einen solchen Bereich. Eine Sondierungsöffnung an einem anderen Riss bestätigt, dass dieser unmittelbar mit dem darunter liegenden Träger zusammenhängt (Abb. 23f). Dies spricht stark für die letztere Annahme.

4.2.3 Materialkennndaten

Als Materialkennndaten lagen zu Projektbeginn, auf Basis des Gutachtens von Neumann [38], die maximale Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck, die quantitative chemische Mörtelzusammensetzung einschließlich der Sieblinie sowie polarisationsmikroskopische Untersuchungen, z.B. zur Verifizierung der chemischen Mörtelanalyse, vor, welche nachfolgend erläutert werden sollen.

Die maximale Wasseraufnahme für jeweils drei verschiedene Mörtel und Ziegel gibt Abb. 24a wieder. Wie zu erwarten, besitzt der Mauermörtel die größte Sättigungsfeuchte, während die des originalen Fugenmörtels nur ungefähr ein Drittel davon beträgt. Der Ersatzmörtel liegt dazwischen. Demgegenüber weisen sämtliche Ziegel, die alle von der Westseite stammen, unabhängig vom Oberflächenzustand größere Werte auf. Beim Mauermörtel muss berücksichtigt werden, dass nur zusammenhängende, ausreichend feste und große Bruchstücke der Prüfung unterzogen werden konnten. Für Stellen, an denen der Mauermörtel bereits weitgehend seine Festigkeit durch Bindemittelauflösung verloren hatte, muss eine deutlich höhere Sättigungsfeuchte angenommen werden.

Zusätzlich wurde an drei Ausbauziegeln der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 24b dargestellt. Da sich der Fugen- und Mauermörtel rückstandsfrei von der Lagerfugenseite entfernen ließ, konnte diese hinsichtlich ihrer Saugfähigkeit mit der Sichtseite verglichen werden. Der Ziegel Z4 wurde auf der Ostseite aus dem augenscheinlich intakten Verbund mit dem originalen Fugenmörtel entnommen und besaß noch seine komplette Brennhaut, die an der Oberfläche leichte gleichmäßige Schwärzungspuren aufwies. Demgegenüber stammen die Ausbauziegel Z5 und Z6 von der Westseite, wobei erstgenannter eine komplett rückgewitterte Oberfläche mit bereichsweise erneuter Schalenbildung besaß. Das umgebende Fugennetz bestand ausschließlich aus dem Ersatzmörtel, während der zweite Ziegel von der Westseite mit optisch intakter Oberfläche, also vollständiger Brennhaut, nur in der oberen Lagerfuge auf ca. 15 cm Länge den Ersatzfugenmörtel erkennen ließ und ansonsten noch vollständig von dem originalen Fugenmörtel umgeben war.

Da es sich bei dem verwendeten Ziegeltyp, um einen industriell, im Strangpressverfahren hergestellten Baustoff handelt, und der Schnitt senkrecht zum Strang erfolgte, bot sich ein Vergleich der Wasseraufnahme mit dieser Fläche, die später im Bauwerk die Lagerfugenseite bildet, und der Sichtfläche in unterschiedlichem Verwitterungszustand an. Abb. 24b belegt eindeutig, dass aufgrund der Brennhaut beim intakten Ziegel die Wasseraufnahme der Sichtseite deutlich geringer ist als auf der Lagerfugenseite.

Geht die Brennhaut durch Schalenbildung und darunter ablaufender Gefügelockerung verloren, kann die Wasseraufnahme stark ansteigen und einen w-Wert in Größe der Lagerfugenseite erreichen oder übersteigen. Die stärkere Saugfähigkeit der geschädigten Ziegeloberflächen wurde ja bereits in dem Foto des Nordgiebels, das unmittelbar nach einem Regenereignis entstanden ist, sehr deutlich. Dies bleibt aber nicht der einzige zu berücksichtigende Aspekt. Werden Fugenmörtel mit zu großer Wasseraufnah-

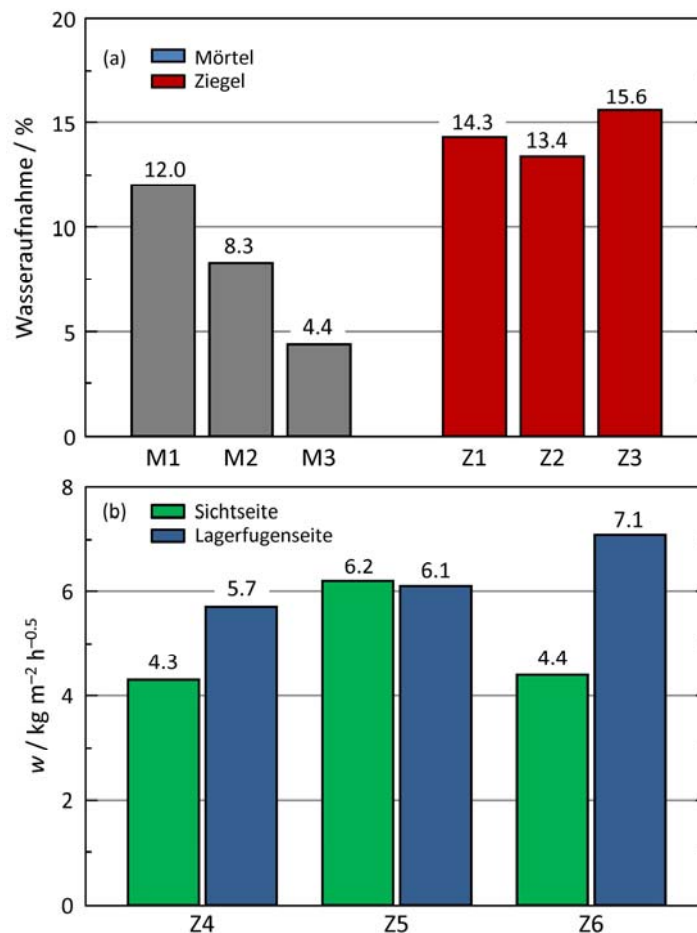


Abb. 24: Wasseraufnahme von Mörtel- und Ziegelproben (nach [38]). (a) Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck von drei Mörtel- (M1–M3) und drei Ziegelproben (Z1–Z3). M1: Mauermörtel, M2: Ersatzfugenmörtel, M3: originaler Fugenmörtel, Z1: Ziegel mit rückgewitterter Oberfläche, Z2: Ziegel mit abgelöster Schale, Z3: Ziegel mit augenscheinlich intakter Oberfläche. (b) Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient A verschiedener Ausbauziegel mit intakter und rückgewitterter Oberfläche (Sichtseite) im Vergleich zur Wasseraufnahme der Lagerfugenseite; Z4: intakt, Ostseite, Z5 rückgewittert Westseite, Z6: intakt Westseite.

mefähigkeit, wie im Beispiel des Ersatzfugenmörtels, verwendet, gelangt mehr Wasser in den Lagerfugensbereich und dringt lateral in den Ziegel hinter die

Brennhaut ein, und kann über die Oberfläche nicht ausreichend schnell trocknen, was zu der beschriebenen stärkeren Verwitterung infolge der zyklischen Salzkristallisation hinter der Brennhaut führt.

Auch wenn die Lagerfugenseite der Ziegel eine Schnittfläche darstellt, so fand durch den Brennprozess eine gewisse Porenverringering statt, während in dem Ziegelquerschnitt eine noch größere Wasseraufnahme zu erwarten ist. Wird im Zuge einer Instandsetzung geschädigter Fugenmörtel z.B. mittels einer Flex und beidseitigem Randschnitt entfernt, bleibt es nicht aus, dass die Lagerfugenseite angrenzend zur Sichtseite angeschnitten wird. Damit kann die Saugfähigkeit erhöht werden, weshalb der Auswahl

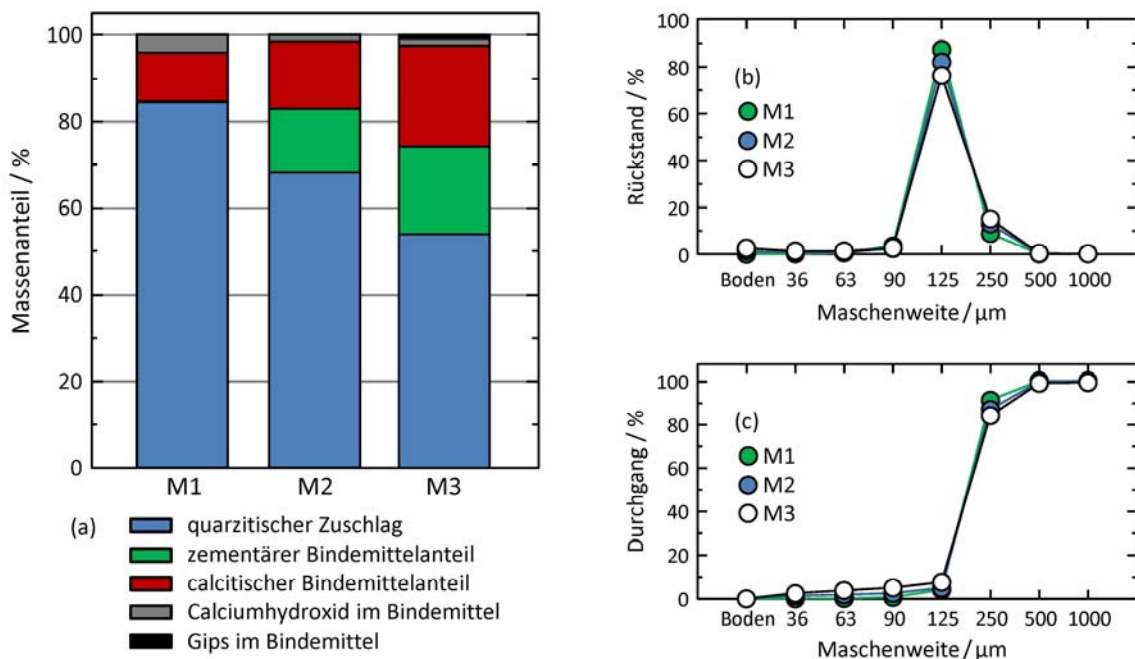


Abb. 25: Chemische Mörtelzusammensetzung (a) und Sieblinie als Siebrückstand (b) und als Siebdurchgang (c) in drei Mörtelproben M1–M3.

eines geeigneten Fugenmörtels und dessen fachgerechte Verarbeitung außerordentliche Bedeutung zukommt.

Die quantitative chemische Zusammensetzung der drei Mörtel ist in Abb. 25a darstellt. Sie unterscheidet sich vor allem im Bindemittel–Zuschlag-Verhältnis. Dieses beträgt in Gewichtsanteilen für den Mauermörtel (M1) 1:5.4, für den Fugenmörtel (M3) 1:1.2 und für den Ersatzfugenmörtel (M2) 1:2.1. Die verschiedenen Anteile wurden nicht auf den Ausgangszustand umgerechnet, wonach z.B. der Calcitanteil sämtlich als Calciumhydroxid (Portlandit) hätte ausgedrückt werden müssen. In die Bezeichnung der einzelnen Bestandteile sind bereits die Kenntnisse aus der zusätzlich durchgeführten polarisationsmikroskopischen Analyse eingeflossen. In der Mörtelzusammensetzung spiegelt sich indirekt auch der Unterschied in der Wasseraufnahme wider. Aufgrund des geringeren Bindemittelanteils besitzt der Ersatzfugenmörtel ein offenerporigeres Gefüge im Hinblick auf seine Wasseraufnahme.

Die Korngrößenverteilungen des säureunlöslichen Zuschlages in den drei untersuchten Mörtelproben sind in Abb. 25b als Siebrückstand und in Abb. 25c als Siebdurchgang dargestellt. Sie unterscheiden sich praktisch nicht. Aufgrund des ausgeprägten Maximums im Siebrückstand bei dem Sieb mit der Maschenweite von 125 μm kann für die drei Mörtel davon ausgegangen werden, dass Dünsand als Zuschlag verwendet wurde. Bei dem Mauermörtel und dem originalen Fugenmörtel handelt es sich um Baustellenmörtel. Dem Fugenmörtel wurde lediglich ein höherer Bindemittelanteil und vor allem auch eine hydraulische Bindemittelkomponente zugefügt. Aus Basis der Sieblinie ist auch für den Ersatzfugenmörtel anzunehmen, dass es sich um eine Baustellenmi-

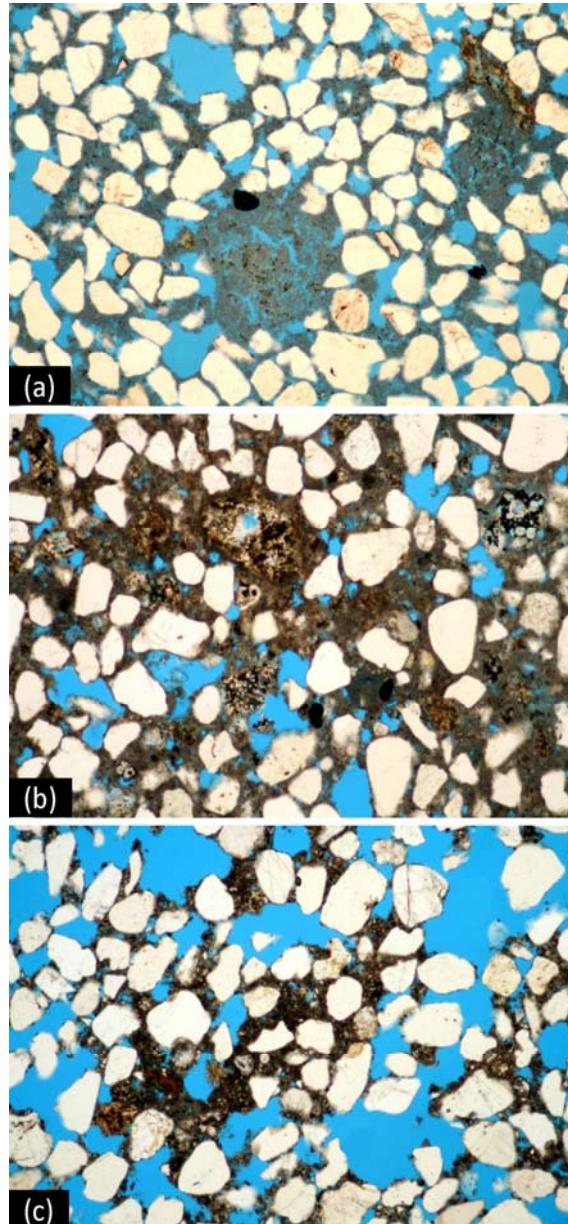


Abb. 26: Polarisationsmikroskopische Aufnahmen. In der Kalkmatrix des mit Dünen sand hergestellten Mauermörtels (a) finden sich vereinzelt Kalkklümpchen. Das Bindemittel des originalen Fugenmörtels (b) besteht aus Kalk und Zement, worauf Restklinkerkörner hindeuten. Als Zuschlag wurde ebenfalls Dünen sand verwendet. Im Ersatzfugenmörtel (c) findet sich im Bindemittel ein erheblicher Zementanteil. Insgesamt ist der Bindemittelgehalt aber wesentlich kleiner als im originalen Fugenmörtel.

schung handelt, auch wenn nicht bekannt ist, wann er appliziert wurde und ob zu diesem Zeitpunkt bereits Werk trockenmörtel hätten in Betracht gezogen werden müssen.

Die polarisationsmikroskopischen Aufnahmen bestätigen das enge, für Dünen sand typische Korngrößenspektrum (Abb. 26). Der mit Abstand am größten vertretene Zuschlaganteil besteht aus Quarzkörnern. Nur vereinzelt finden sich aus Quarz bestehende Gesteinsfragmente, Feldspat, Muskovit und Schwerminerale im Zuschlag, während Kalk-

stein in keinem Mörtel nachgewiesen wurde. Somit lässt sich der gesamte, in der chemischen Analyse nachgewiesene Carbonatgehalt dem Bindemittel zuordnen. In dem kalkigen Bindemittel des Mauermörtels (Abb. 26a) sind in geringem Umfang noch Kalkklumpen bzw. sogenannte Kalkspatzen vorhanden, die auf ein Trockenlöschen des Brandkalkes hinweisen. Hydraulische Anteile im Mauermörtel gehen auf Verunreinigungen zurück. Durch den höheren Bindemittelgehalt entstand bei dem originalen Fugenmörtel ein sehr viel dichteres, weniger poröses Gefüge, zumindest was den Anteil an lichtmikroskopisch sichtbaren Poren betrifft (Abb. 26b). In der braunen Bindemittelmatrix lässt sich noch ein hoher Anteil von Restklinkerkörnern der zementären Bindemittelkomponente nachweisen, wobei es sich hauptsächlich um die ferritische Phase handelt, die einen Teil der Matrix der Klinkerkörner bildet. Die C_2S - und C_3S -Anteile liegen nur noch als Relikte in diesen Körnern vor. Die Restklinkerkörner sind im Vergleich zu heutigen Zementen hinsichtlich ihres Gefüges sehr inhomogen, was einen Hinweis auf einen Schachtofenzement bildet. Auch in dem Ersatzmörtel in Abb. 26c lassen sich Restklinkerkörner nachweisen, die eindeutig Zement als wesentlichen Bindemittelbestandteil belegen. Das Bindemittel ist sehr unregelmäßig verteilt, d.h. der Mörtel wurde vor Ort nicht ausreichend gut gemischt. Damit entstehen sehr bindemittelarme Bereiche und Bindemittel-Zuschlag-Agglomerate. Das Gefügebild veranschaulicht, dass dieser Fugenmörtel sehr viel besser Wasser aufnehmen und weiterleiten kann als der originale Fugenmörtel.

Für eine Bestimmung der Festigkeitsparameter mittels Druck- und Biegezugprüfungen im Labor, waren insbesondere die aus dem Mörtel gewinnbaren Probenkörper zu klein. Im Fall des Mauermörtels ließen sich keine verwendbaren Proben aus den Lager- oder Stoßfugen gewinnen, da dieser sofort zerbröselte, so dass darauf verzichtet werden musste.

4.2.4 Untersuchungen zur Salzbelastung

Für die Beurteilung der Salzbelastung am Objekt wurde im Mai 2012 eine umfassende Untersuchungskampagne durchgeführt, in deren Rahmen umfangreiche Bohrungen zur Bestimmung von Tiefenprofilen der Salzbelastung im Sockelbereich auf der Ost-, West- und Seite der Grundschule erfolgten. In Ergänzung zu diesen Messungen konnte auf die Ergebnisse früherer Untersuchungen durch die Fa. Remmers zurückgegriffen werden, bei denen mehrere vertikale Profile von Bohrungen auf verschiedenen Gebäudeseiten durchgeführt wurden [38]. Leider wurden bei diesen Untersuchungen lediglich die Anionenkonzentrationen in allen Proben gemessen. Kationenmessungen erfolgten nur sporadisch. Für die detaillierte Charakterisierung der am Bauwerk vorliegenden Salzgemische und der Bewertung ihres Kristallisationsverhaltens kamen deshalb vor allem die eigenen, im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Messungen in Betracht. In Abb. 27 sind die verschiedenen Beprobungsbereiche in der Übersicht dargestellt. In Abb. 28 sind Übersichtsaufnahmen der beprobten Fassadenbereiche zu sehen. Die genauen Positionen der einzelnen in diesen Bereichen entnommenen Proben können Abb. 29 entnommen werden.

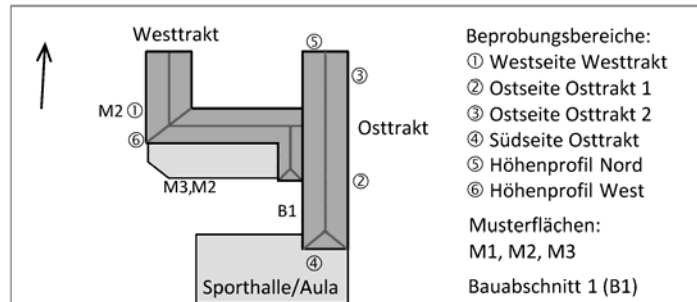


Abb. 27: Grundriss der Grundschule Norderney (nicht maßstabsgerecht) mit den Beprobungsbereichen für Salzanalysen und mikroskopische Untersuchungen (1–4 dieses Vorhaben, 5 und 6 Vertikalprofile aus [38]) sowie Lage der Musterflächen 1–3 und des Bauabschnitts 1.

Im Rahmen der Untersuchungskampagne im Mai 2012 wurden zunächst sieben Bohrungen bis in eine Tiefe von ca. 40 cm, jeweils von einer Mörtelfuge ausgehend, gebohrt. Um möglichst selektiv den Fugenmörtel zu beproben, wurde für die Ausführung dieser Bohrungen ein Bohrdurchmesser von 12 mm gewählt und das Bohrmehl wurde in verschiedenen Tiefenintervallen entnommen. Die Bohrungen wurden bis in mindestens 40 cm Tiefe ausgeführt. Bei den Bohrungen wurde auch versucht, Hohlräume zu detektieren. Drei Bohrungen wurden auf der Westseite des Westtraktes jeweils in ca. 0,8 m Höhe im Sockelbereich unterhalb der Fenster ausgeführt (vgl. Abb. 29a). Zusätzlich wurden in analoger Weise vier Bohrmehlprobenentnahmen auf der Ostseite des Osttraktes der Grundschule (vgl. Abb. 29c und d) in vergleichbarer Höhe (0,86–1,1 m Höhe) entnommen. Die Bohrmehlproben wurden im Labor nach wässriger Elution auf ihren Gehalt löslicher Salze untersucht. In den wässrigen Eluaten wurden die Hauptbestandteile mittels Flammen-Atomemissionsspektrometrie (Natrium und Kalium), Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (Magnesium und Calcium) sowie mittels Ionenchromatographie (Chlorid, Nitrat, Sulfat) bestimmt.

Die Ergebnisse der Salzgehalte in den sieben genannten Bohrungen sind in den Abb. 30 (Westfassade) und Abb. 31 (Ostseite) zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die Gehalte der Kationen und Anionen als gestaffelte Ladungsäquivalente. Die Gesamthöhen der Balken geben also die Gesamtgehalte von Kationen und Anionen in molaren Ladungsäquivalenten an. Diese Art der Darstellung erlaubt es, direkt die Beiträge der verschiedenen Kationen und Anionen zu bilanzieren. Unterschiedliche Kationen- bzw. Anionen-Gesamtladungsäquivalente weisen auf fehlende, d.h. nicht gemessene Ionen hin oder sind Folge von Messfehlern.

In allen Bohrungen nimmt der Gesamtgehalt in Richtung der Mauerwerksoberfläche stark zu, in der Mehrzahl der Bohrungen liegt aber auch in der Tiefe des Mauerwerks eine signifikante Salzbelastung vor. Es ist weiterhin deutlich zu erkennen, dass Natrium (blau) und Calcium (gelb) die mit Abstand wichtigsten Kationen im Mauerwerk sind, während auf der Anionenseite Chlorid (blau) und Sulfat (gelb) dominieren. Die Zuordnung der farbig markierten Bereiche lässt schon erkennen, dass Calcium hauptsächlich als Sulfat und Natrium überwiegend als Chlorid vorliegt.

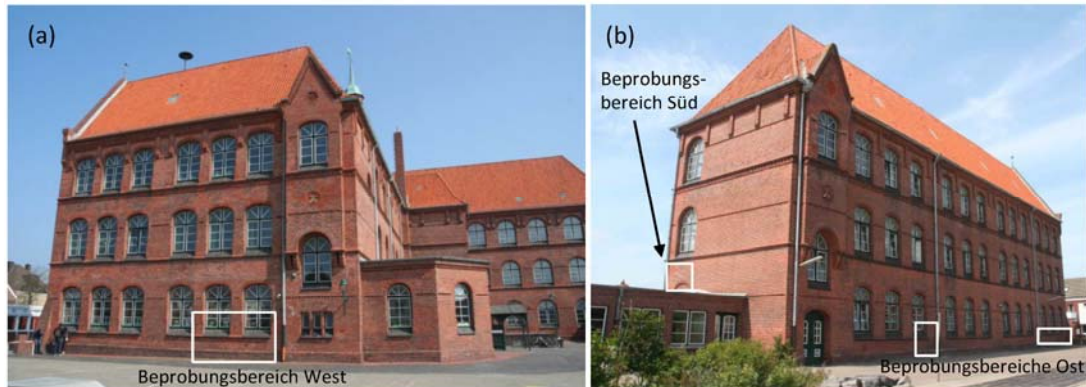


Abb. 28: Probenentnahme an der Grundschule Norderney im Mai 2012. (a) Westfassade des Westtraktes, (b) Ost- und Südfassade des Ostraktes.

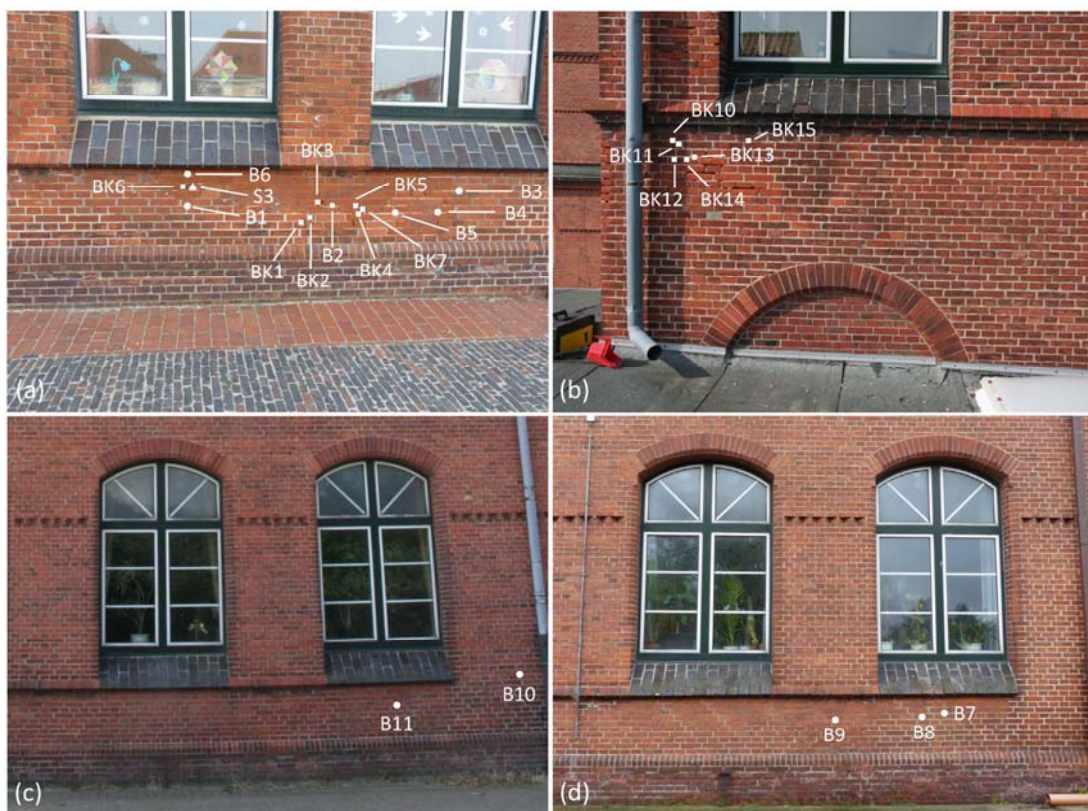


Abb. 29: Grundschule Norderney, Probenpläne. (a) Beprobungsbereich Westfassade mit den Proben B1–B6 sowie BK1–BK7, (b) Beprobungsbereich Südfassade des Ostraktes mit den Proben BK10–BK15 (oberhalb des Durchgangs zur Sporthalle), (c) Beprobungsbereich Ostfassade 1 (Proben B10 und B11), (d) Beprobungsbereich Ostfassade 2 (Proben B7–B9).

Die Natrium- und Chloridgehalte erstrecken sich von Werten unterhalb der Bestimmungsgrenze ($<0.1\%$) bis zu hohen Salzgehalten von 0.33% Natrium (Bohrung B2) bzw. 0.7% Chlorid (Bohrungen B2 und B10). Die Gehalte von Calcium und Sulfat erreichen noch höhere Maximalwerte und erstrecken sich von 0.1% bis zu Spitzenwerten von 1.25% Calcium bzw. 2.8% Sulfat (jeweils in Probe B1). Unter der vernünftigen Annahme, dass Calcium und Sulfat als Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vorliegen, entspricht

dies einem Gipsgehalt von immerhin ca. 5% im originalen Fugenmörtel von Probe B1. Insgesamt variieren die Salzgehalte, besonders die von Chlorid und Natrium, recht stark und es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen der Ost- und Westfassade der Grundschule zu erkennen. Ebenso wenig sind die Unterschiede zwischen dem originalen alten Fugenmörtel und dem jüngeren Ausbesserungsmörtel signifikant. Schließlich ist festzustellen, dass bei den Bohrungen in einigen Tiefenbereichen auffällig wenig Bohrmehl angefallen ist, so dass vermutlich Hohlräume vorliegen. Diese Bereiche sind in Abb. 30 und Abb. 31 kenntlich gemacht. Die Tiefenprofile zeigen aber trotz dieser Hohlräume einen gleichmäßigen Verlauf und keine abrupten Konzentrationssprünge. Es ist also trotz der Hohlräume von einer gleichmäßigen Salzverteilung im Mauerwerk und somit von weitgehend ungehindertem Transport auszugehen.

Aufgrund der in den Fugen zu den Oberflächen hin deutlich zunehmenden Salzgehalte erschien es sinnvoll, weitere Tiefenprofile in den Ziegeln mit höherer Auflösung in Oberflächennähe zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden vor Ort Bohrkerne entnommen, die nachfolgend im Labor mit Hilfe einer Fräsprobenahme weiter aufgearbeitet wurden, um im oberflächennahen Bereich Proben mit hoher Tiefenauflösung zu gewinnen. Insgesamt sieben Bohrkerne wurden aus Ziegeln entnommen. Die vier Kerne BK2, BK3, BK6 und BK7 stammen aus dem gleichen Bereich an der Westfassade, in dem auch die Bohrungen B1–B3 in den Mörtelfugen durchgeführt wurden (vgl. Abb. 29a). Der Kern BK9 entstammt dem Probenbereich der Ostfassade, in dem die Bohrmehlentnahmen B10 und B11 durchgeführt wurden (rechts des in Abb. 29c sichtbaren Regenfallrohrs). Schließlich wurden drei Bohrkerne (BK11, BK12 und BK14) auf der Südseite in der Nähe der SW-Ecke in einer Höhe von ca. 1.6 m über dem Dach des Verbindungsbaus zur Turnhalle entnommen (vgl. Abb. 29b).

In den aus den genannten Bohrkernen durch Fräsen und Sägen gewonnenen Proben wurden ebenfalls nach wässriger Elution mittels IC, F-AES und F-AAS die Gehalte der wichtigsten ionischen Bestandteile bestimmt. Die Ergebnisse für die auf der Westseite entnommenen Kerne (BK2, BK3, BK6, BK7) sind in Abb. 32 zusammengefasst. Die Salzgehalte im Bohrkern BK9 (Ostfassade) sowie den Kernen BK11, BK12 und BK14 (Südseite) sind in Abb. 33 dargestellt.

Prinzipiell bestätigen die Messwerte die Ergebnisse der Bohrungen mit Bohrmehlentnahme in den Fugen. Die Belastung weist hohe Anreicherungen an den Ziegeloberflächen auf und besteht im Wesentlichen aus einem hohen Anteil an Gips und recht variablen zusätzlichen Gehalten eines leichter löslichen Salzgemisches, das Natrium und Chlorid als Hauptbestandteile enthält. Aufgrund der mit der Fräsprobenahme erzielten höheren Auflösung kann der starke Salzgradient in der Nähe der Ziegeloberfläche (besonders im Falle von Gips) noch besser detektiert werden, so dass noch höhere Maximalwerte in den oberflächennahen Proben bestimmt wurden. Die in diesen Anreicherungsschichten gemessenen Calcium- und Sulfatgehalte betragen immerhin 0.35–8.0% Calcium und 0.7–18.9% Sulfat. Dies entspricht Gipsgehalten unmittelbar an der Ziegeloberfläche zwischen 1.5% (BK3) und 34.5% (BK11). Aufgrund des begrenzten verfügbaren Porenvolumens für die Aufnahme solch hoher Salzgehalte ist klar, dass in diesen Proben erhebliche Gefügeschädigungen vorliegen müssen.

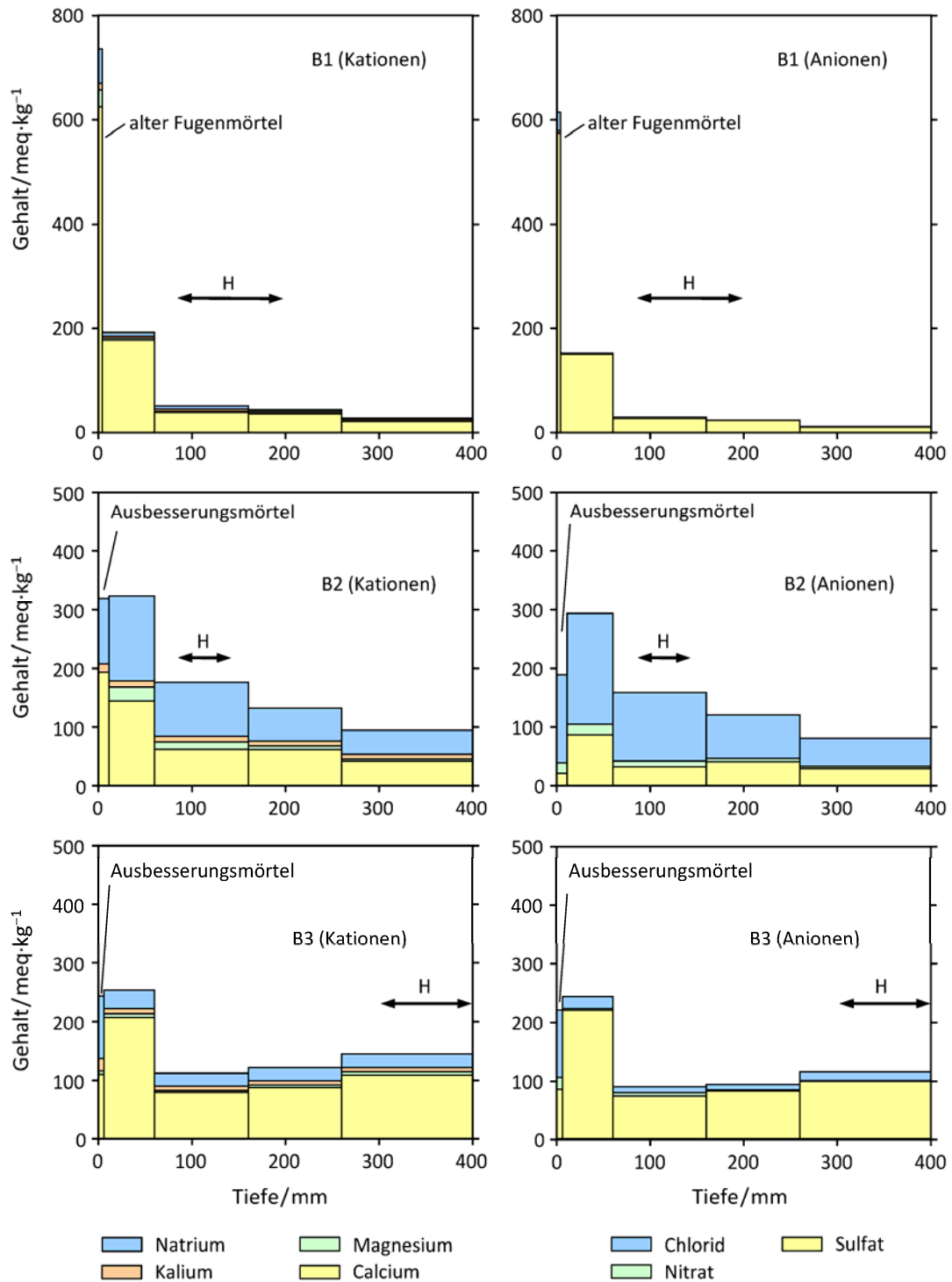


Abb. 30: Salztiefenprofile in den Bohrungen auf der Westseite (B1–B3); die Gehalte der Kationen und Anionen sind als gestaffelte Ladungsäquivalente angegeben (H: Hohlraum).

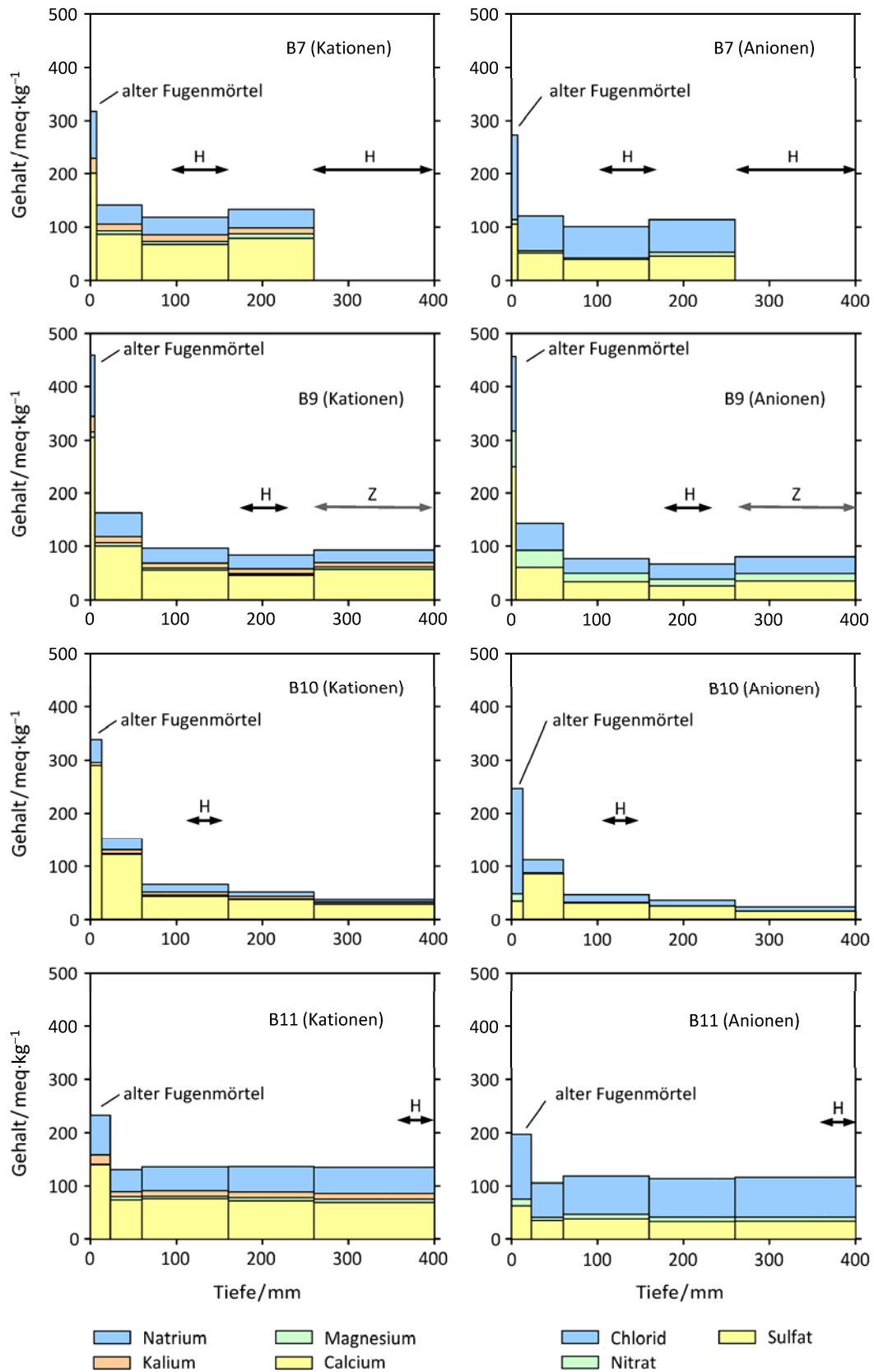


Abb. 31: Salztiefenprofile in den Bohrungen auf der Ostseite (B7, B9–B11); die Gehalte der Kationen und Anionen sind als gestaffelte Ladungsäquivalente angegeben (H: Hohlraum, Z: überwiegend Ziegel).

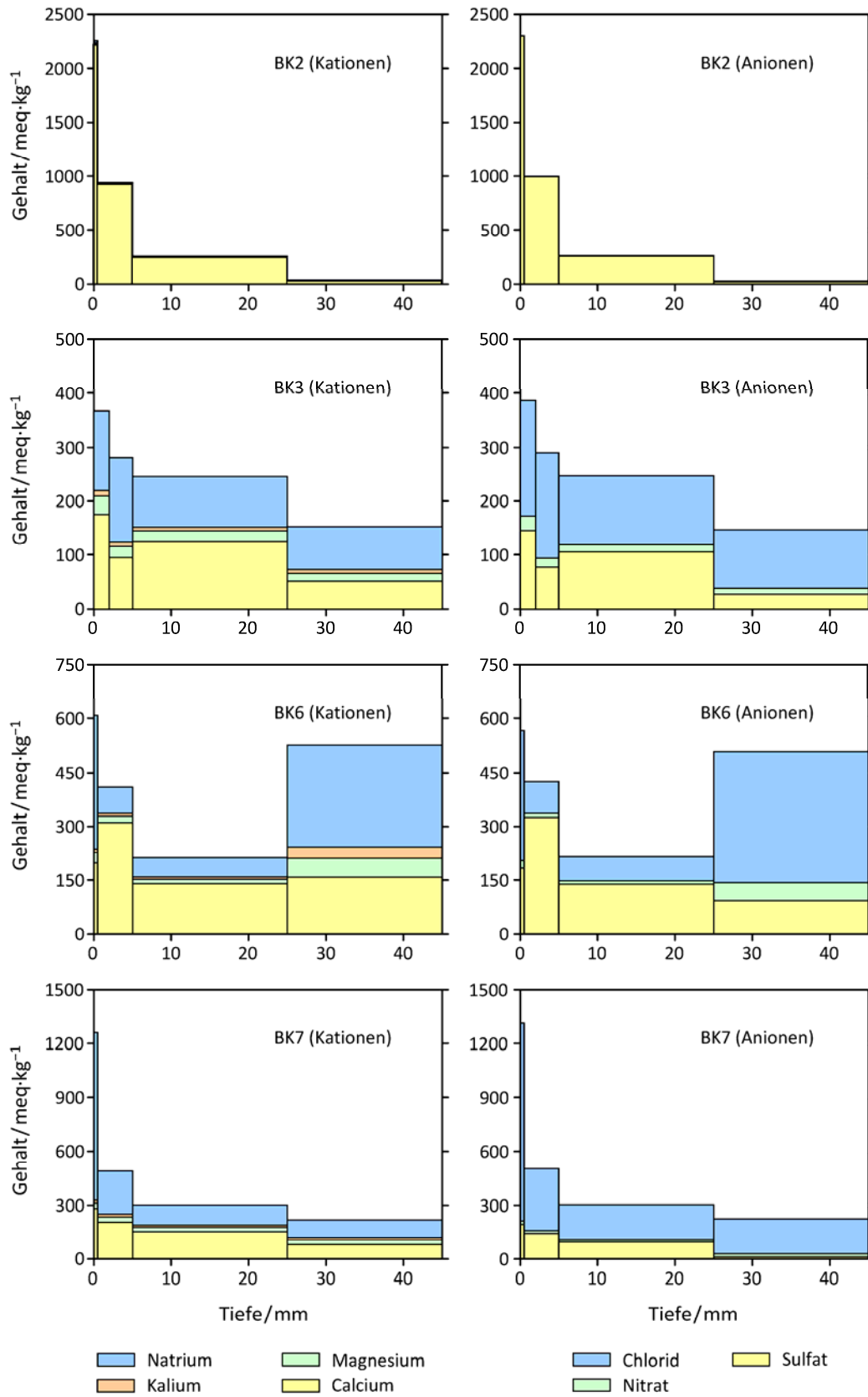


Abb. 32: Hochaufgelöste Salzprofile in Bohrkernen aus Ziegeln auf der Westseite (BK2, BK3, BK6, BK7); die Gehalte der Kationen und Anionen sind als gestaffelte Ladungsäquivalente angegeben.

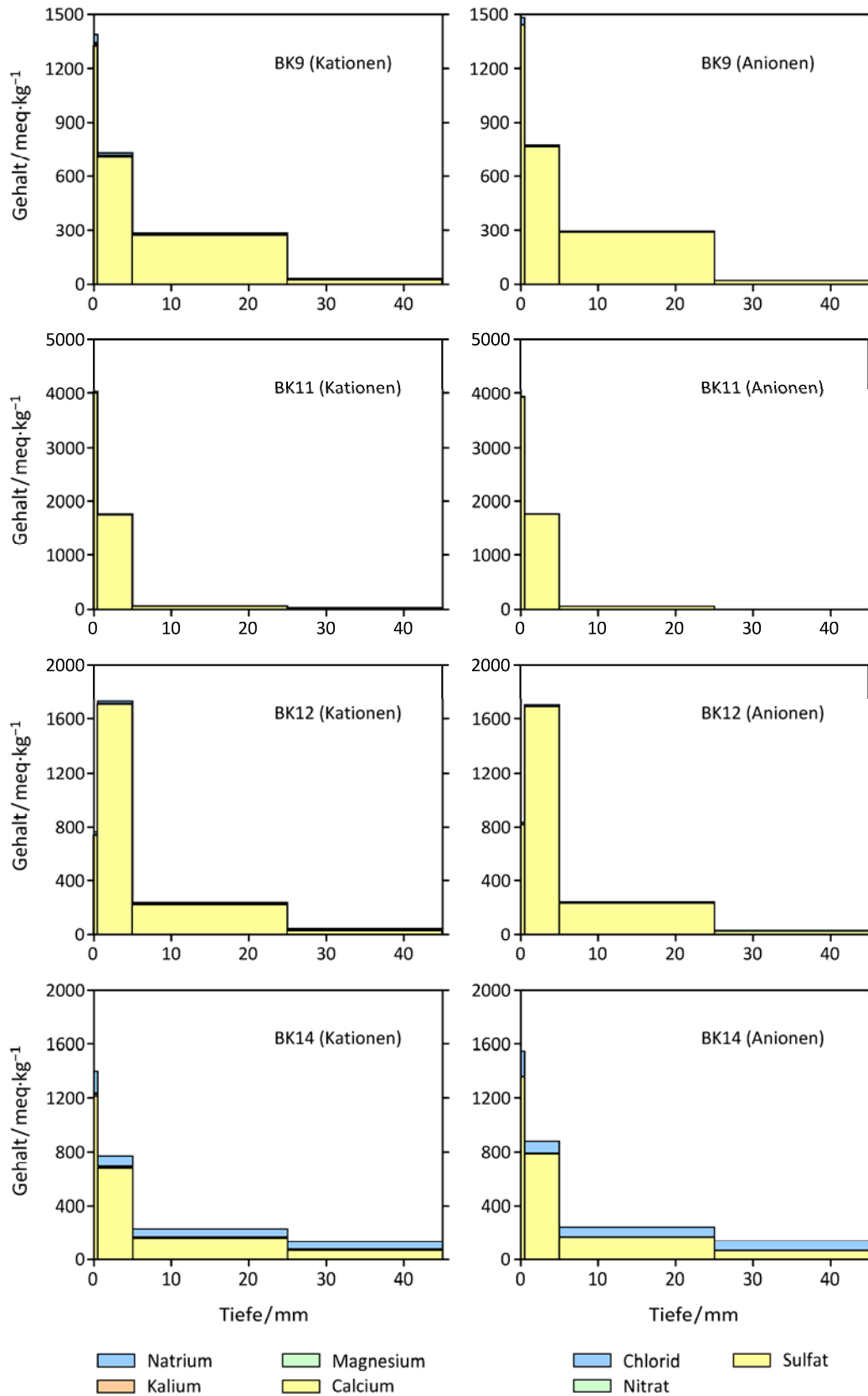


Abb. 33: Hochaufgelöste Salzprofile in Bohrkernen aus Ziegeln auf der Ost- (BK9) und Südseite (BK11–BK14); die Gehalte der Kationen und Anionen sind als gestaffelte Ladungsäquivalente angegeben.

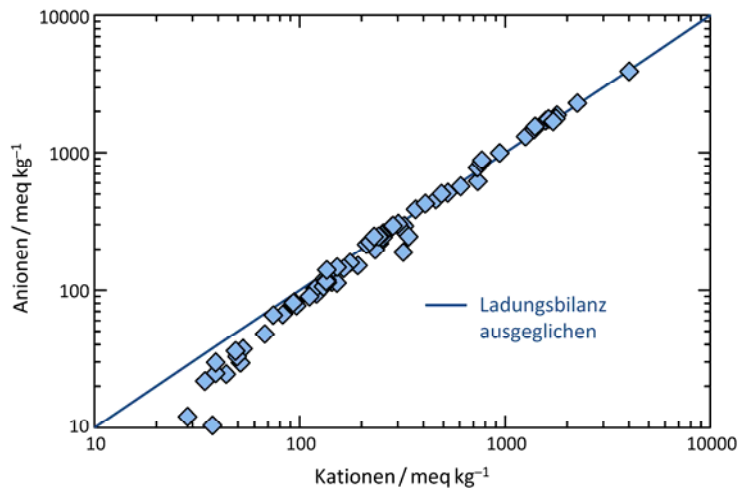


Abb. 34: Kationen–Anionen-Bilanzen in allen Proben der Bohrungen B1–B11 und BK1–BK14; die Gerade beschreibt eine ausgeglichene Ladungsbilanz.

Für die weitere Auswertung der Zusammensetzung des Salzgemisches im Mauerwerk und seines Kristallisationsverhaltens wurden zunächst die Kationen–Anionen-Bilanzen betrachtet. Diese sind graphisch in Abb. 34 dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass bei höheren Salzgehalten (größer ca. $100\text{--}200\text{ meq kg}^{-1}$) die Ionenbilanz im Rahmen akzeptabler analytischer Streuungen als ausgeglichen betrachtet werden kann. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die sieben gemessenen Ionen wirklich die Hauptbestandteile der wasserlöslichen Salze darstellen und keine weiteren, nicht gemessenen Kationen oder Anionen in den Proben vorhanden sind.

Bei kleineren Salzgehalten ist jedoch ein signifikanter Kationenüberschuss festzustellen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass hierfür besonders Calcium verantwortlich ist, für das in den gering versalzten Proben die möglichen Gegenanionen Chlorid, Nitrat und Sulfat nicht in ausreichender Menge vorhanden sind, um die Ladung auszugleichen. Dies ist ein in der Baustoffanalytik typisches Verhalten [40]. Ein wichtiger anionischer Bestandteil, der in Baustoffen eigentlich immer zu berücksichtigen ist, ist die sog. Alkalität, also die Summe der Äquivalentkonzentrationen von Carbonat (CO_3^{2-}), Hydrogencarbonat (HCO_3^-) und Hydroxid (OH^-). Diese Ionen können immer dann Hauptbestandteile sein, wenn in einem Baustoff größere Mengen löslicher alkalischer Verbindungen vorhanden sind [41]. Calcit (CaCO_3) ist einer der Hauptbestandteile vieler Baustoffe, z.B. in Mörteln, Kalksteinen oder Kalksandsteinen. Calcit weist eine, wenn auch geringe, Wasserlöslichkeit auf, weshalb er sich an (historischen) Bauwerken durch kapillaren Wassertransport oder durch oberflächlich ablaufendes Regenwasser verteilen kann. Auf diese Weise können sich über längere Zeiträume auch in Materialien, die eigentlich kein Calcit enthalten, z.B. in silicatischen Sandsteinen, Calcitablagerungen ausbilden.

Werden calcithaltige Baustoffe einer wässrigen Elution zur Bestimmung löslicher Salze unterzogen, so wird entsprechend seiner Löslichkeit immer auch Calcit mobilisiert, d.h. Calcit geht als Hydrogencarbonat in Lösung. Da die Bestimmung von Carbonat bzw.

Hydrogencarbonat in geringen Konzentrationen schwierig, mit viel Aufwand verbunden und nicht spezifisch gegenüber verschiedenen anderen Anionen ist, wird bei Baustoffanalysen in der Regel darauf verzichtet, so auch in diesem Vorhaben. Dies hat zur Folge, dass bei der wässrigen Elution der Proben eine bestimmte Menge an Calcium mobilisiert wird, für die kein Gegenanion bestimmt wird. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit von Calcit ist der resultierende Kationenüberschuss in Proben, die größere Mengen lösliche Salze enthalten, vernachlässigbar und ist im Rahmen typischer analytischer Streuungen nicht zu detektieren. Bei niedrigen Salzgehalten ist dieser durch zusätzliche Mobilisierung von Calcium verursachte Kationenüberschuss aber nicht mehr vernachlässigbar. Für das bei den hier durchgeführten Messungen verwendete Verhältnis von Elutionsvolumen zu Probeneinwaage von 50 mL g^{-1} ergibt sich eine Mobilisierung von Calcium, die einem Gehalt von ca. 50 meq kg^{-1} entspricht. Dies ist der maximale Wert, der bei der Elution eines calcithaltigen Materials erreicht werden kann, wenn ausreichend lange eluiert wird, so dass sich das Löslichkeitsgleichgewicht einstellt. Außerdem wird vorausgesetzt, dass das zur Elution verwendete Wasser mit atmosphärischem CO_2 gesättigt ist. Bei den hier vorgestellten Messungen wurde zur Elution bidestilliertes Wasser verwendet dessen CO_2 -Gehalt zum Zeitpunkt der Elution vermutlich noch nicht wieder mit atmosphärischem CO_2 gesättigt war, so dass auch aus diesem Grund eine etwas geringere Calcitmobilisierung zu erwarten ist. Legt man einen Wert von maximal 50 meq kg^{-1} zugrunde, so sind die aus Abb. 34 ersichtlichen Werte von ca. $30\text{--}40 \text{ meq kg}^{-1}$ sehr plausibel. Erwartungsgemäß werden deutlichere Kationenüberschüsse in den Mörtelproben (Bohrmehlproben) als in den Ziegelproben (Bohrkerne) beobachtet.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass es sich bei der Calcitmobilisierung um ein reines Messartefakt handelt. Unter Bauwerksbedingungen kommt es nicht zu einer Mobilisierung von Calcit in vergleichbarem Umfang. Ursache hierfür ist die im Vergleich zur Elution unter Laborbedingungen um ein Vielfaches geringere Wassermenge, die für die Calcitlösung zur Verfügung steht. Beispielsweise beträgt die Wassermenge je Gramm Gestein bei einem Kalkstein mit einer Porosität von 20% (das entspricht einer Dichte von ca. 2.15 g cm^{-3}) lediglich 0.023 mL g^{-1} [40], während bei den durchgeführten Messungen im Labor 50 mL Wasser pro Gramm Gestein eluiert wurde. Die für Lösungsprozesse verfügbare Wassermenge ist also unter Bauwerksbedingungen selbst bei vollständiger Wassersättigung des Porenraums typischerweise mehr als drei Größenordnungen geringer als unter Laborbedingungen.

Sofern also in einer Probe ein Kationenüberschuss vorliegt und dieser die aufgrund der theoretischen Löslichkeit zu erwartende Calcitmobilisierung nicht übersteigt, ist eine Korrektur der gemessenen Calciumgehalte anzuraten, um das tatsächlich unter Bauwerksbedingungen im Porenraum vorliegende Salzgemisch realistischer abzubilden. Eine entsprechende Korrektur wurde auch mit den zunächst gemessenen Calciumkonzentrationen durchgeführt. Die korrigierten Calciumwerte wurden nach folgender einfachen Gleichung berechnet (vgl. [40]).

$$c_{\text{Ca}}(\text{korr}) = c_{\text{Ca}} - \frac{1}{2}(E_{\text{K}} - E_{\text{A}}) \quad (1)$$

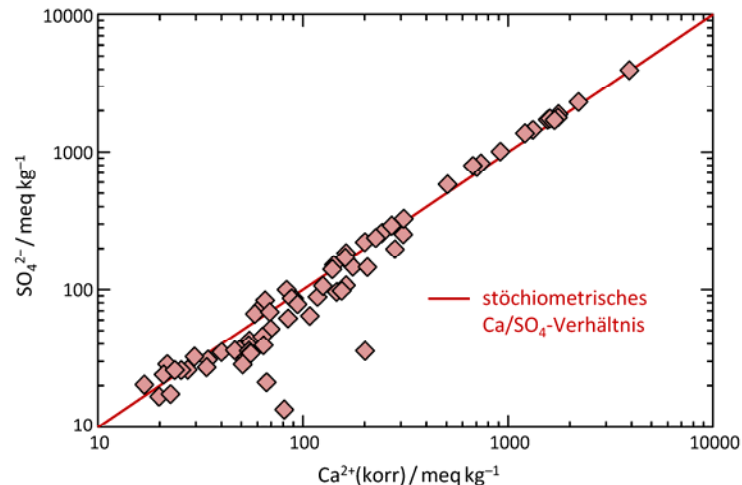


Abb. 35: Korrelationen der Gehalte von Calcium (korrigiert) und Sulfat in allen Proben der Bohrungen B1–B11 und BK1–BK14; die Gerade beschreibt das stöchiometrische $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ -Verhältnis in Gips.

Es sind c_{Ca} und $c_{\text{Ca}}(\text{korr})$ die Äquivalentgehalte von Calcium (in meq kg^{-1}) vor und nach Korrektur; E_{K} und E_{A} sind die Summen der Kationenaquivalentgehalte (c_{K}) von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium (letzteres unkorrigiert) sowie der Anionengehalte (c_{A}) von Chlorid, Nitrat und Sulfat. Nach dieser Korrektur sind die Ionenbilanzen in allen Proben ausgeglichen, d.h. es gilt $E_{\text{K}} = E_{\text{A}}$, wenn E_{K} mit den korrigierten Calciumkonzentrationen berechnet wird. In keiner Probe war eine so starke Korrektur der Calciumgehalte erforderlich, die unter Berücksichtigung von Calcitlöslichkeit und analytischem Fehler nicht plausibel wäre. Alle weiteren Auswertungen wurden deshalb mit den so korrigierten Calciumgehalten durchgeführt.

In Abb. 35 ist die Korrelation zwischen den korrigierten Calcium- und den Sulfatgehalten dargestellt. Es bestätigt sich die bereits zuvor aus den Tiefenprofilen ersichtliche hohe Korrelation. Die Werte streuen um das stöchiometrische Verhältnis in Calciumsulfat und es bestätigt sich, dass offensichtlich beide Ionen in der Mehrzahl der Proben als Gips vorliegen. Als Hauptquelle für die Gipsanreicherungen ist sicherlich der langjährige Eintrag von Schwefeldioxid (SO_2) in das Mauerwerk zu konstatieren. Der Haupteintragsweg ist dabei die trockene Deposition von SO_2 , vorzugsweise in Feuchtigkeitsfilme auf den Mineraloberflächen, die anschließende Oxidation in wässriger Phase und Bildung von Schwefelsäure und schließlich die Reaktion mit den Mineralbestandteilen der Baustoffe unter Bildung von Sulfaten [42]. Aufgrund seiner verhältnismäßig schlechten Löslichkeit ist deshalb die Kristallisation und Anreicherung von Gips das bevorzugte Endprodukt, selbst wenn zunächst leichter lösliche Sulfate gebildet werden sollten. Da aber aus den bereits zuvor genannten Gründen in Baustoffen praktisch immer Calcit vorhanden ist, erfolgt häufig die Bildung von Gips primär.

Die deutlich schlechtere Löslichkeit von Calciumsulfat (Gips) und Calciumcarbonat (Calcit) ist eine wichtige Grundlage für die Klassifizierung von Salzgemischen, die üblicherweise an Bauwerken auftreten können [43,44]. Ausgehend von den wichtigsten Hauptbestandteilen von Salzsystemen in Baustoffen, den Anionen Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ,

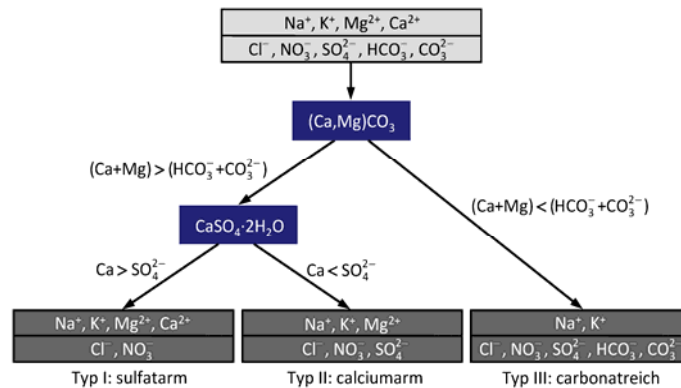


Abb. 36: Entwicklung der Haupttypen von Salzsystemen (in Anlehnung an [43])

CO_3^{2-} und HCO_3^- sowie den Kationen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} sind wichtige Kristallisationsabfolgen, die zu unterschiedlich zusammengesetzten Salzsystemen führen, in Abb. 36 dargestellt. Die Löslichkeiten der Erdalkalicarbonate ist rund 2–3 Größenordnungen kleiner als die von Gips und ca. 4–5 Größenordnungen kleiner als die der übrigen Salze aus dem genannten Salzgemisch. Die Verdunstung von Wasser aus Lösungen, in den die genannten Ionen enthalten sind, führt deshalb immer zuerst zur Ausscheidung der verschiedenen Erdalkalicarbonate, also von Calcit, Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) oder Nesquehonit ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Konzentrierte Porenlösungen, die im Mauerwerk transportiert werden können, enthalten also niemals gleichzeitig Carbonat und die Erdalkalielemente Calcium und Magnesium. Umgekehrt können hohe Konzentrationen an löslichem Carbonat bzw. Hydrogencarbonat nur mit den Alkalimetallen als Gegenionen vorliegen. Bei solchen Salzgemischen handelt es sich um Mischungen des Typs III nach der Klassifizierung von Steiger et al. [43,44]. Sie werden immer dann beobachtet, wenn an einem Bauwerk alkalische Baustoffe in größerem Umfang eingesetzt wurden [41]. Liegt ein solches Gemisch vor, so resultieren sehr große Kationenüberschüsse, wenn keine Messung von Carbonat bzw. Hydrogencarbonat erfolgt ist, und es werden deutliche erhöhte pH-Werte in den Eluaten beobachtet. Ein Salzgemisch des Typs III liegt an der Grundschule eindeutig nicht vor.

Verbreiteter als die beschriebenen carbonatreichen Systeme ist der Fall, dass die Summe der Calcium- und Magnesiumgehalte größer ist als die verfügbare Carbonat- bzw. Hydrogencarbonatmenge. In diesem Fall stellt die Kristallisation von Gips die zweite wichtige Barriere bei der Entwicklung hochkonzentrierter Porenlösungen dar. Sofern die anfängliche Calciumkonzentration größer ist als die Sulfatkonzentration, wird abgesehen von einer kleinen Restlöslichkeit von Gips nahezu das gesamte Sulfat aus der Lösung entfernt und es resultiert eine sulfatarme (calciumreiche) Porenlösung (Typ I). Solche Salzgemische sind üblicherweise sehr hygroskopisch, vor allem wenn sie einen hohen Anteil an Magnesium und besonders an Calcium aufweisen. Die am wenigsten löslichen Salze in solchen Mischungen sind NaCl (Halit), KNO_3 (Nitrokalit) und NaNO_3 (Nitronatrit), die in solchen Fällen häufig als Ausblühsalze auftreten.

Enthält eine Salzmischung mehr Sulfat als Calcium, so entwickelt sich eine calciumarme (oder sulfatreiche) Salzmischung (Typ II). In diesem Fall treten neben Gips noch

weitere Sulfate und häufig auch Nitrate auf. Solche Salzgemische entwickeln sich häufig unter dem Einfluss von Luftschadstoffen, wenn die vorhandene Calcitmenge im Baustoff nicht ausreicht, um das aus der Atmosphäre abgeschiedene Sulfat vollständig zu binden, also beispielsweise in silicatischen Sandsteinen oder in Ziegeln. Eine Besonderheit dieser Salzsysteme ist die Bildung einer Vielzahl von Doppelsalzen unter Beteiligung von Sulfat. Zu erwähnen sind insbesondere Darapskit, $\text{Na}_3\text{NO}_3\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Glaserit, $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$, Schönit, $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Astrakanit, $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ und Syn-genit, $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Wichtige Nitrate in Salzsystemen des Typs II sind NaNO_3 und KNO_3 .

Vor diesem Hintergrund ist das in der Grundschule anzutreffende Salzsystem als Grenzfall zwischen den Typen I und II zu klassifizieren (vgl. Abb. 35). Die Korrelation zwischen den korrigierten Calcium- und Sulfatgehalten ist sehr hoch und die Gehalte weichen kaum vom stöchiometrischen Verhältnis in Gips ab. Die Tatsache, dass die Streuungen um die stöchiometrische Zusammensetzung größer sind als in den in Abb. 34 dargestellten Ionenbilanzen zeigt allerdings, dass es sich um reale Abweichungen handelt und nicht um analytische Streuungen. Mit anderen Worten, es gibt Proben, in denen signifikant mehr Calcium als Sulfat vorhanden ist und umgekehrt. Bei genauerer Betrachtung der Daten stellt sich heraus, dass Sulfatüberschüsse vor allem in den Ziegelproben vorliegen, also dort, wo die im Material vorhandene Calcitmenge nicht ausreicht, um das aus der Atmosphäre abgeschiedene SO_2 oder auch das Sulfat aus marinen Quellen vollständig in Form von Gips zu binden. In den Ziegelproben handelt es sich deshalb überwiegend um Salzgemische des Typs II. Allerdings sind die Sulfatüberschüsse in den entsprechenden Proben nur recht klein, so dass beide Ionen nahezu ausschließlich als Gips vorliegen. In den Mörtelproben finden sich teilweise, in Proben mit insgesamt geringerer Gipsbelastung, auch Salzgemische des Typs I mit einem Calciumüberschuss (vgl. Abb. 7). Insgesamt bleibt aber festzuhalten, dass die Abweichungen nur recht gering sind und mit zunehmender Gipsbelastung abnehmen.

Aufgrund der exponierten Lage auf der Insel Norderney stand zu erwarten, dass der Eintrag von Seesalz entweder gelöst im Niederschlag oder in Form von Aerosolpartikeln neben dem Eintrag von Luftschadstoffen eine weitere wichtige Quelle für die Versalzung des Mauerwerks darstellt. Global betrachtet stellt die Emission von Seesalz aus den Ozeanen eine der bedeutendsten, wenn nicht die bedeutendste Aerosolquelle dar. Obwohl Aerosole marinen Ursprungs in der Atmosphäre weit transportiert werden können, ist ihre Konzentration doch in Quellnähe, d.h. an der Küste am größten. Die Zusammensetzung von atmosphärischem Seesalz entspricht im Wesentlichen derjenigen von Seewasser, sie weist im globalen Maßstab auch bei unterschiedlicher Salinität eine überraschend geringe Variabilität hinsichtlich der ionischen Zusammensetzung auf [45]. Die sechs Ionen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- und SO_4^{2-} machen >99% der gesamten im Meerwasser gelösten Feststoffmasse aus. Der Beitrag der Hauptbestandteile Natrium und Chlorid beläuft sich auf 85.6%. Allerdings liegen diese beiden Ionen nicht in äquimolaren Konzentrationen vor, sondern es besteht ein Chloridüberschuss. Das molare Cl^-/Na^+ -Verhältnis in Seewasser beträgt $w(\text{Cl}/\text{Na}) = 1.165$. Die nächsthäufigsten Ionen sind Sulfat (7.7%) und Kalium (3.7%). Aufgrund dieser Zusammensetzung gehört Seesalz in

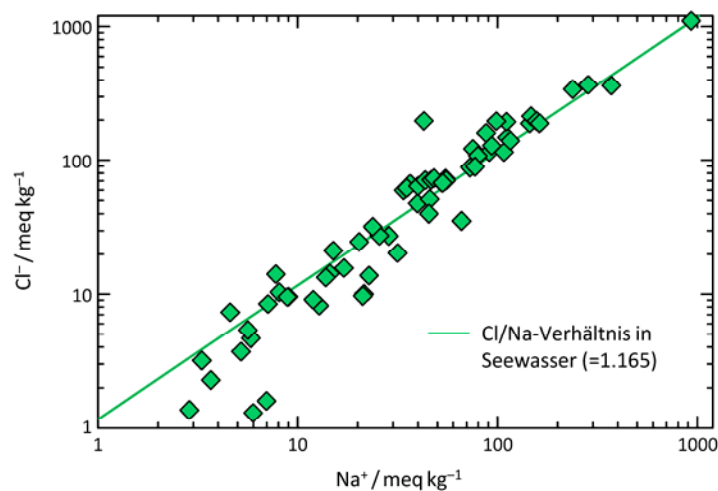


Abb. 37: Korrelationen der Gehalte von Natrium und Chlorid in allen Proben der Bohrungen B1–B11 und BK1–BK14; die Gerade entspricht dem molaren Cl^-/Na^+ -Verhältnis in Seewasser.

die Kategorie von Salzgemischen des Typs II. Die wichtigsten kristallinen Phasen, die sich bei der Verdunstung von Seewasser bilden, sind Halit, NaCl , MgSO_4 -Hydrate, und Carnallit, $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Die teilweise hohen Gehalte an Natrium und Chlorid bestätigen die Vermutung, dass der Eintrag von Seesalz neben der Deposition von atmosphärischen Schadstoffen die zweite Hauptquelle für die Salze im Mauerwerk der Grundschule ist. In Abb. 37 ist die Korrelation zwischen Natrium und Chlorid dargestellt. Es liegt eine recht gute Korrelation vor und die Messwerte streuen um das molare Cl^-/Na^+ -Verhältnis in Seewasser, das ebenfalls in der Abbildung dargestellt ist. Der aus allen untersuchten Proben berechnete gewichtete Mittelwert von $w(\text{Cl}/\text{Na}) = 1.14$ unterscheidet sich unter Berücksichtigung der Streuungen nicht signifikant vom Verhältnis in Seewasser. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der Eintrag von Seesalz als Hauptquelle beider Ionen zu betrachten ist.

In Abb. 38 ist die Zusammensetzung des Kationengemisches unter Vernachlässigung von Calcium dargestellt, das ja nahezu vollständig in Form von Gips gebunden ist. Zum Vergleich sind die relativen Äquivalentanteile von Natrium, Magnesium und Kalium in Seewasser angegeben (gelber Punkt). Insbesondere in den Proben mit hohem Chloridgehalt von $>0.5\%$ nähert sich die Zusammensetzung der Proben der Zusammensetzung von Seesalz an (blaue Symbole). In den stark salzbelasteten Proben ist Seesalz offensichtlich auch die Hauptquelle für Kalium und insbesondere Magnesium. Mit abnehmendem Chloridgehalt (grüne Symbole: $0.1\text{--}0.5\%$, weiße Symbole: $<0.1\%$) nimmt besonders der Kaliumanteil bei den Kationen zu, so dass hier auch geringe Beiträge aus anderen Quellen vorliegen.

Zusammenfassend lässt sich das Salzsystem im Mauerwerk der Grundschule von Norderney als ein Gemisch aus Gips und Seesalz mit variierender Zusammensetzung charakterisieren. Obwohl eine sehr starke Anreicherung der Salzmischungen in Richtung Materialoberflächen zu konstatieren ist, liegt auch in der Tiefe des Mauerwerks eine

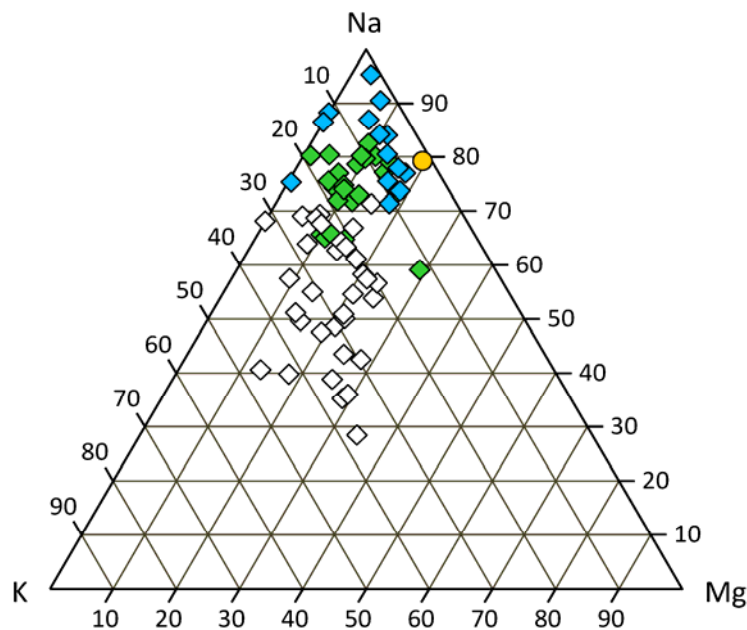


Abb. 38: Kationenzusammensetzung unter Vernachlässigung von Calcium. Die Proben sind entsprechend des Chloridgehaltes klassifiziert: blau: $> 0.5\%$, grün: $0.1\text{--}0.5\%$, weiß: $< 0.1\%$.

erhebliche Versalzung vor (vgl. Abb. 30–Abb. 33), die ein erhebliches Schadenspotenzial darstellt. Das Verhalten der beiden aus unterschiedlichen Quellen stammenden Salze ist grundsätzlich verschieden und führt zu einem unterschiedlichen Verhalten am Bauwerk auch hinsichtlich des Schadensmechanismus.

Hat sich Gips in einem Porensystem angereichert und ist einmal auskristallisiert, ist er aufgrund seiner geringen Mobilität praktisch vollständig immobilisiert. Definiert man als Mobilität eines Salzes die im Porenraum vorhandene Menge des Salzes, die sich bei vollständiger Füllung der Pore gerade noch auflöst und somit transportiert werden kann, so erhält man für Gips aufgrund seiner geringen Löslichkeit je nach Porosität des betrachteten Materials Werte von ca. $0.1\text{--}0.25\text{ g kg}^{-1}$ ($0.01\text{--}0.025\text{ Mas.}\%$) [43]. Die in den Mörtel- und Ziegeloberflächen bestimmten Gipsgehalte bewegen sich zwischen 13 g kg^{-1} und 34.5 g kg^{-1} (1.3% und 34.5% , s.o.) und liegen somit mehr als zwei Größenordnungen höher als es der Mobilität von Gips entspricht. Vergleicht man die Werte, so ist klar, dass nur ein sehr kleiner Anteil (max. ca. 2%) des im Porenraum vorhandenen Salzes wieder gelöst werden kann, selbst wenn der Porenraum vollständig mit Wasser befüllt wird, z.B. bei Beregnung. Charakteristisch für die Gipsanreicherung im Mauerwerk und seine Verteilung ist also eine kontinuierliche Zunahme der Porenbefüllung durch kontinuierlichen Eintrag von Schwefeldioxid im Verlauf von Jahrzehnten. Der einmal gebildete Gips verbleibt dort, wo er zuerst auskristallisiert ist, d.h. die im Mauerwerk ermittelten Tiefenprofile unterliegen nahezu keiner Dynamik, da sich auch bei vollständiger Sättigung des Mauerwerks im Verlauf eines Starkregenereignisses nur ein Bruchteil der Gipsanreicherung in Lösung geht und transportiert werden kann.

Sobald Gipskristalle im Zuge ihrer Anreicherung im Porenraum eingeschlossen sind, d.h. bei ihrem Wachstum auf Porenwände treffen, können sie Kristallisationsdruck aufbauen, der bei ausreichender Porenfüllung und Ausbildung ausreichender Übersättigung leicht zu einer mechanischen Schädigung von Ziegel und Mörtel führt. Dieser Schadensmechanismus ist bekannt und wurde mehrfach ausführlich diskutiert [vgl. 44,46, 47].

Aufgrund seiner geringen Löslichkeit besitzt reiner Gips eine extreme hohe Deliqueszenzfeuchtigkeit von über 99% relativer Luftfeuchtigkeit (RH). Schädliche Kristallisationszyklen von reinem Gips können also nicht durch Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit ausgelöst werden. Selbstverständlich kann aber durch Zuführung von flüssigem Wasser der in einem Porenraum eingeschlossene Gips partiell gelöst werden, so dass bei der anschließenden Trocknung erneut Gipskristalle gegen die Porenwände wachsen und Kristallisationsdruck aufbauen können. Schädliche Kristallisationszyklen können also durch Beregnungs- und Trocknungszyklen ausgelöst werden.

Im Vergleich zu Gips weist Natriumchlorid (NaCl) mit $10\text{--}40\text{ g kg}^{-1}$ (1–4 Mas.%) eine erheblich höhere Mobilität auf. Selbst in den am stärksten mit Seesalz belasteten Proben wird die Mobilitätsgrenze nicht signifikant überschritten, d.h. bei vollständiger Porenraumsättigung mit Wasser kann das im Porenraum befindliche Salz vollständig gelöst und transportiert werden. Die in Abb. 30–Abb. 33 dargestellten Profile der Ionen Chlorid, Nitrat, Natrium, Kalium und Magnesium unterliegen deshalb einer ausgeprägten Dynamik. Bei langanhaltenden Schlagregenereignissen können diese Salze vollständig aufgelöst und in tiefere Mauerwerksbereiche transportiert werden. Bei der anschließenden Trocknung des Mauerwerks werden die Salze zurück zur Oberfläche transportiert und ein charakteristisches Salzprofil kann sich ausbilden. Bei geringerer Niederschlagsintensität beschränken sich die Lösungs- und Rekristallisationsvorgänge auf den oberflächennahen, durch Schlagregen beeinflussten Bereich. Auch diese Salze können bei der Kristallisation in Poren Kristallisationsdruck aufbauen, der bei ausreichender Porenfüllung zu einer erheblichen mechanischen Belastung und zur Schädigung von Mörtel und Ziegel führen kann. Aufgrund der höheren Löslichkeit der genannten Salze sind sie hygroskopisch, weisen also deutlich niedrigere Deliqueszenzfeuchten auf. Reines Natriumchlorid würde beispielsweise oberhalb 75% RH in Lösung gehen und bei Unterschreitung dieser Feuchte wieder auskristallisieren [44,47]. Das bedeutet, dass schädliche Kristallisationszyklen nicht nur bei Beregnung sondern auch durch Luftfeuchtigkeitsschwankungen ausgelöst werden können.

Das Verhalten von Salzgemischen ist allerdings deutlich komplexer, da sich Salze gegenseitig in ihrer Löslichkeit beeinflussen. Die Folge ist, dass das Kristallisationsverhalten nicht mehr nur durch eine Deliqueszenzfeuchtigkeit eindeutig beschrieben werden kann, sondern durch einen Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit, innerhalb dem Schwankungen zu zyklischen Lösungs- und Kristallisationsvorgängen führen. Weiterhin verkompliziert wird das Verhalten dadurch, dass viele Salze in verschiedenen Hydratstufen auftreten und sich weiterhin eine Vielzahl von Doppelsalzen bilden können [44,47].

Aufgrund der großen Komplexität der an Bauwerken anzutreffenden Salzgemische ist es nicht pragmatisch, das Verhalten der jeweiligen Gemische im Einzelfall in Laborversuchen zu bestimmen. Stattdessen ist die Verwendung von Modellen aussichtsreicher, mit denen das Verhalten von Salzgemischen rechnerisch simuliert werden kann [48,49]. In Abb. 28 ist der Kristallisationsverlauf in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit des hygroskopischen (leicht löslichen) Anteils von Seesalz dargestellt. Die Kristallisationsabfolge wurde mit dem Computerprogramm ECOS-Runsalt [vgl. 40,50, 51] berechnet. Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass das im Seesalz enthaltene Calcium in Form Gips ausgeschieden wird. Für das dann verbleibende Salzgemisch ergibt sich der in Abb. 39 dargestellte Kristallisationsverlauf. Die vom Programm berechneten Umwandlungsfeuchtigkeiten zwischen den verschiedenen Magnesiumsulfat-Hydraten sind nicht korrekt und wurden entsprechend dem neuesten Phasendiagramm $\text{MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ [52] korrigiert.

Oberhalb der im Diagramm als RH_{krit} angegebenen relativen Luftfeuchtigkeit kommt es in einer Seewasserprobe nicht zur Kristallisation eines Bestandteils. Unterhalb dieser kritischen Luftfeuchtigkeit beginnt die Kristallisation von Natriumchlorid und mit sinkender Luftfeuchtigkeit nimmt die kristalline NaCl -Menge schnell zu. Die Ursache für den steilen Anstieg ist darin zu sehen, dass Natriumchlorid der dominierende Hauptbestandteil in Seewasser ist, so dass sich das Gemisch recht ähnlich zu reinem Natriumchlorid verhält. In einer reinen NaCl -Lösung würde die Kristallisation bei 75% RH beginnen und es würde bei Unterschreitung dieser kritischen Luftfeuchtigkeit die gesamte Salzmenge auskristallisieren. Der hohe Anteil von NaCl führt also dazu, dass dessen Kristallisationsverhalten durch das verbleibende Salzgemisch recht wenig beeinflusst wird. Umgekehrt wird aber das Verhalten anderer gelöster Bestandteile stark durch die hohe NaCl -Konzentration beeinflusst. So beginnt die Kristallisation von $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomit) erst bei 65% RH, obwohl dieses Salz bei der gleichen Temperatur (20 °C) aus einer reinen Magnesiumsulfatlösung bereits bei 91% RH auskristallisiert. Auch Kaliumchlorid (KCl), das im Verlauf der Verdunstung intermediär auftritt, kristallisiert erst bei deutlich niedrigerer Luftfeuchtigkeit (59%) als im Falle einer reinen Salzlösung (85% bei 20 °C).

Im weiteren Verlauf der Kristallisation erfolgt unterhalb von 47% RH die Entwässerung von Epsomit unter Bildung von $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Kieserit). Diese Reaktion ist allerdings kinetisch stark gehemmt, so dass die Bildung von $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Hexahydrat) und bei noch tieferer Luftfeuchtigkeit von $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Starkeyit) wahrscheinlicher ist. Auch das anfänglich gebildete KCl löst sich im Verlauf der weiteren Eindunstung wieder auf und es kristallisiert stattdessen $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Carnallit) aus. Erst bei 32% RH ist der Trocknungspunkt erreicht (im Diagramm als MDRH 'mutual deliquescence humidity' bezeichnet, vgl. [44]). Unterhalb dieser zweiten kritischen relativen Luftfeuchtigkeit verdunstet die Lösung vollständig und es kristallisiert $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Bischofit). Die Zusammensetzung des resultierenden Salzgemisches wäre dann Halit, Kieserit (bzw. ein anderes MgSO_4 -Hydrat), Carnallit und Bischofit. Da die dafür erforderlichen niedrigen Luftfeuchtigkeiten bei Außenmauerwerken nur äußerst selten auftreten, ist die Kristallisation von Bischofit in der Praxis kaum zu erwarten. Im Sinne des oben beschriebenen

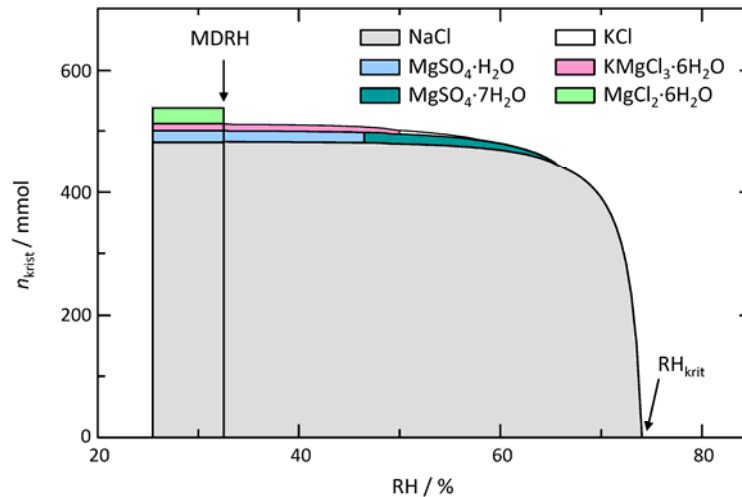


Abb. 39: Kristallisationsverhalten von Seesalz bei 20 °C; es ist die Menge an kristallinem Salz als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt, die aus einer Seewasserprobe auskristallisiert, die 1 kg Wasser enthält.

Schadensmechanismus wären also Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen MDRH (32%) und RH_{krit} bedenklich, da NaCl (und in geringem Umfang andere Salze) zyklisch Lösungs- und Kristallisationsprozessen ausgesetzt wären. Als besonders kritisch wären Schwankungen zwischen ca. 60% und 75% RH anzusehen, da in diesem Bereich der Hauptteil der NaCl-Kristallisation stattfindet.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass dieses Kristallisationsverhalten durch den ebenfalls im Mauerwerk vorhandenen Gips nicht merklich beeinflusst wird. Um den Einfluss der übrigen, ebenfalls in den Salzgemischen nachgewiesenen leicht löslichen Salze zu ermitteln, wurden weitere Rechnungen mit ECOS-Runsalt durchgeführt. In Abb. 40 ist der Kristallisationsverlauf bei 20 °C für das im ersten Tiefensegment der Probe B9 (0–5 mm) bestimmte Salzgemisch dargestellt. Die Korrektur der experimentellen Rohdaten erfolgte, wie bereits zuvor diskutiert wurde und ausführlich in [40] dargestellt ist. Auch nach der ersten Korrektur der Calciumgehalte bestand immer noch ein deutlicher Überschuss von Calcium verglichen mit Sulfat, so dass es sich bei dieser Probe, die von der Westfassade stammt, um ein Salzgemisch des Typs I (sulfatarm) handelt (vgl. Abb. 31). In solchen Gemischen liegt also immer ein mehr oder weniger großer Anteil von Calcium in Form von Chlorid bzw. Nitrat vor, wodurch solche Gemische, insbesondere bei hohem Calciumgehalt, sehr hygroskopisch sind. Weiterhin auffällig war bei der Probe der vergleichsweise hohe Nitratanteil (vgl. Abb. 30 und Abb. 31), weshalb sie gut geeignet ist, um den Einfluss anderer Salze als Seesalz im Gemisch zu untersuchen.

Gips wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt, d.h. es wurde angenommen, dass der gesamte Sulfatgehalt der Probe in Form von Gips immobilisiert vorliegt. Auf diese Weise ergibt sich ein Gipsgehalt der Mörtelprobe B9 (0–5 mm) von 125 mmol kg^{-1} . Bei vollständiger Trocknung der wasserlöslichen Salzfraktion der Probe ergibt sich ein etwas höherer kristalliner Salzgehalt von 171 mmol kg^{-1} .

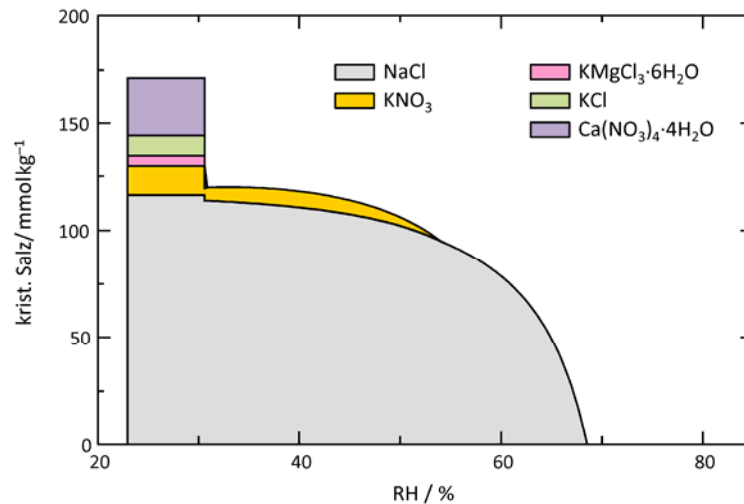


Abb. 40: Kristallisationsverhalten des Salzgemisches in Probe B9 (0–5 mm).

Die trockene Salzmischung setzt sich dann aus den Chloriden Halit, Sylvin (KCl) und Carnallit sowie den Nitraten Nitrokalit (KNO₃) und Nitrocalcit (Ca(NO₃)₂·4H₂O) zusammen. Trotz des Calciumüberschusses und des vergleichsweise hohen Nitratgehaltes der Probe zeigt der in Abb. 40 dargestellte Kristallisationsverlauf aber deutlich, dass Schadensprozesse alleine durch zyklische Kristallisation von Halit, und in deutlich geringerem Umfang von Nitrokalit verursacht sind. Die übrigen Salze kristallisieren erst bei ausgesprochen niedrigen Luftfeuchtigkeiten aus (auch das eigentlich wenig hygroskopische KCl!), die im Außenbereich der Grundschule nur äußerst selten erreicht werden.

Im Vergleich zu dem in Abb. 39 dargestellten Kristallisationsverlauf von reinem Seesalz, sind aber auch Unterschiede erkennbar. Aufgrund des höheren Anteils hygroskopischer Calciumsalze beginnt die NaCl-Kristallisation erst bei kleineren Luftfeuchtigkeiten ($RH_{krit} = 68,5\%$) und bei Unterschreitung der kritischen Luftfeuchtigkeit verläuft die Kurve flacher. Insgesamt ist für die NaCl-Kristallisation eine geringere Luftfeuchtigkeit erforderlich. Berücksichtigt man typische klimatische Verhältnisse in Außenluft, so ist aber in beiden Fällen mit dem Auftreten von Kristallisationszyklen zu rechnen, die mit Sicherheit schadensrelevant sind.

Entsprechende Berechnungen, wie in Abb. 40 dargestellt, wurden auch für die Oberflächenbereiche, also die jeweils ersten Segmente der übrigen Bohrungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 zusammengefasst. In der Tabelle sind zunächst die Gesamtgehalte von Gips und der wasserlöslichen Salzfraktion (jeweils in mmol kg⁻¹) angegeben. Für Gips gilt $100 \text{ mmol kg}^{-1} = 1,72 \text{ Mas.}\%$, für die Salzgemische ist der Umrechnungsfaktor von der Zusammensetzung abhängig. In der folgenden Spalte von Tab. 6 sind der Hauptbestandteil der hygroskopischen Salzfraktion und die kritische Luftfeuchtigkeit RH_{krit} , bei deren Unterschreitung diese Phase auskristallisiert, angegeben. Schließlich sind in der letzten Spalte weitere kristalline Phase, die im Verlauf der Kristallisation des Gemisches oberhalb 30% RH kristallisieren. Die Vielfalt der in der letzten Spalte aufgelisteten Salze soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass Halit das

Tab. 6: Zusammenfassung der Salzkonzentrationen und des Kristallisationsverhaltens in den Proben B1–B11 und BK2–BK14.

	Gips mmol/kg	hygrosk. Salze mmol/kg	Hauptsalz (<RH)	sonstige Phasen ⁽¹⁾
B1	251	57	Halit (70%)	Blo, Nit, Gla, Eps
B2	10	148	Halit (72%)	Syl
B3	43	130	Halit (73%)	Nit, Syl
B7	53	141	Halit (71%)	Syl
B9	125	171	Halit (69%)	Nit
B10	18	130	Halit (65%)	keine (>30% RH)
B11	32	113	Halit (71%)	Syl
BK2	1132	10	Glaserit (94%) ⁽²⁾	The, Blo, Sch
BK3	73	182	Halit (72%)	keine (>30% RH)
BK6	78	396	Halit (74%)	Nit, Nat, Blo, Eps
BK7	98	1014	Halit (74%)	Keine (>30%)
BK9	710	47	Halit (72%)	Blo, Gla, Sch, Nit
BK11	1957	12	Halit (73%)	Gla, Blo, Sch, The, Eps
BK12	406	20	Halit (71%)	Nit, Blo, Eps
BK14	680	176	Halit (74%)	Syl, Car

⁽¹⁾ Blo: $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Bloedit), Eps: $\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomit), Gla: $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$ (Glaserit), Nat: NaNO_3 (Nitronatrit), Nit: KNO_3 (Nitrokalit), Sch: $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Schönit), Syl: KCl (Sylvin), The: Na_2SO_4 (Thenardit)

⁽²⁾ neben Gips gibt es kaum lösliche Bestandteile; von dieser kleinen Fraktion ist Na_2SO_4 (Thenardit) Hauptbestandteil, Glaserit kristallisiert allerdings zuerst aus

dominierende Salz in nahezu allen Proben ist. In dieser Hinsicht ist der in Abb. 40 dargestellte Kristallisationsverlauf charakteristisch, d.h. andere Salzen als Halit kommt im relevanten Luftfeuchtigkeitsbereich nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Mengemäßig bedeutsam sind allenfalls in einigen Proben Nitrokalit (KNO_3) und Sylvin (KCl).

Als kritischer Schadensprozess sind deshalb Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Bereich von ca. 40–75% zu nennen. Diese führen zur zyklischen Kristallisation von hauptsächlich Halit und in deutlich geringerem Umfang einiger anderer Salze. Diese zyklischen Kristallisationen sind eindeutig schadensrelevant. Sie können im Außenmauerwerk nicht unterbunden werden. Salzminderungsmaßnahmen scheinen ebenfalls wenig aussichtsreich, da sich die Versalzung, das zeigen die Profile in Abb. 30 und Abb. 31, bis in große Tiefen erstreckt. Weiterhin schadensrelevant sind, wie bereits erwähnt wurde, die teilweise sehr hohen Gipsgehalte. Schließlich ist zu beachten, dass sich aus verschiedenen Gründen die Schadenswirkung von Gips einerseits sowie der hygroskopischen Salzfraktion mit dem Hauptbestandteil Natriumchlorid andererseits, gegenseitig verstärken. Zunächst führt Gips unabhängig von seiner eigenen schädigenden Wirkung zu einer starken Auffüllung des verfügbaren Porenvolumens, dadurch verringert sich das für die Kristallisation der übrigen Salze verfügbare Volumen. Während

der durch Wachstum eingeschlossener Kristalle ausgeübte Kristallisationsdruck von der Übersättigung der Porenlösung und somit von weiteren Randbedingungen wie z.B. Verdunstungsraten etc. abhängig ist [46], bestimmt der Porenfüllgrad unmittelbar die bei gegebenem Kristallisationsdruck auftretende Beanspruchung durch Zugspannung im Material [53,54]. Die Auffüllung des Porenraums mit Gips bedeutet, dass bereits bei kleineren Konzentrationen von Halit höhere Porenfüllgrade erreicht werden, so dass die Wirksamkeit des Salzes steigt.

Umgekehrt beeinflusst auch die lösliche Salzfraktion das Verhalten von Gips im Porenraum [55]. Liegt ausschließlich Gips in hoher Konzentration im Porenraum vor, so entstehen Schäden vor allem durch Zyklen von Beregnung und anschließender Trocknung. Ist die Porenfüllung ausreichend groß, so ist die Auflösung eines kleinen Anteil des Gipses ausreichend, um durch anschließende Trocknung und Kristallisation bei jedem Zyklus Kristallisationsdruck und eine mechanische Beanspruchung von Ziegeln und Mörteln zu verursachen. Im Gemisch mit löslichen, d.h. hygroskopischen Salzen führt die hygroskopische Wasseraufnahme durch das Salz ebenfalls zur Bildung einer Porenlösung, in der Gips partiell gelöst wird. Dieser Prozess ist umso effektiver, da die Löslichkeit von Gips durch fremdionige Salze (Chloride und Nitrate von Natrium, Kalium und Magnesium), deutlich erhöht wird [48,55]. Die gleichen Luftfeuchtigkeitsschwankungen, die also für die zyklische Kristallisation von Halit an der Grundschule verantwortlich sind, verursachen auch zyklische Kristallisation von Gips.

Oberhalb der in Tab. 6 aufgelisteten kritischen Luftfeuchtigkeiten ist die hygroskopische Salzfraktion vollständig in Lösung. Bei weiterer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit nehmen diese Salze weiter Wasser auf, weshalb hygroskopische Feuchteaufnahme erheblich zur Durchfeuchtung eines Mauerwerks beitragen kann. Insbesondere bei hohen Salzgehalten übersteigt die durch die Salze verursachte hygroskopische Feuchteaufnahme deutlich die durch Material selbst aufgrund seiner Porosität verursachten Feuchteaufnahme, Hygroskopische Salze sind dann Hauptverursacher von Materialdurchfeuchtungen. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 41 die rechnerisch ermittelten hygroskopischen Fechteaufnahmen dreier Oberflächenproben dargestellt. Da das Programm ECOS–Runsalt entsprechende Berechnungen nicht erlaubt, wurden die Rechnungen mit einem anderen Modell durchgeführt (vgl. [52,56,]).

In der Abbildung ist die Wasseraufnahme in Massenprozent bei steigender Luftfeuchtigkeit oberhalb der kritischen Luftfeuchtigkeit, bei der, abgesehen von Gips, keine Salze mehr kristallin vorliegen. Weiterhin dargestellt sind die maximalen Fechteaufnahmen bei vollständiger Sättigung des Porenraums (horizontale gestrichelte Linien). Diese Sättigungsfeuchten wurden dem bereits erwähnten, unveröffentlichten Bericht von Neumann [38] entnommen (vgl. auch Abb. 24, S. 42). Dort werden für verschiedene an der Grundschule verwendete Materialien maximale Fechtegehalte bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck angegeben. Beispielsweise beträgt die maximale Wasseraufnahme des alten Fugenmörtels 4.4%. Damit zu vergleichen ist das erste Segment von Probe B9, das bis in eine Tiefe von 5 mm als Bohrmehlprobe entnommen wurde. Es handelt sich dabei um die Probe, deren Kristallisationsverhalten in Abb. 40 dargestellt ist. Aus Tab. 6 ist zu entnehmen, dass das Salzgemisch oberhalb 69% vollständig gelöst

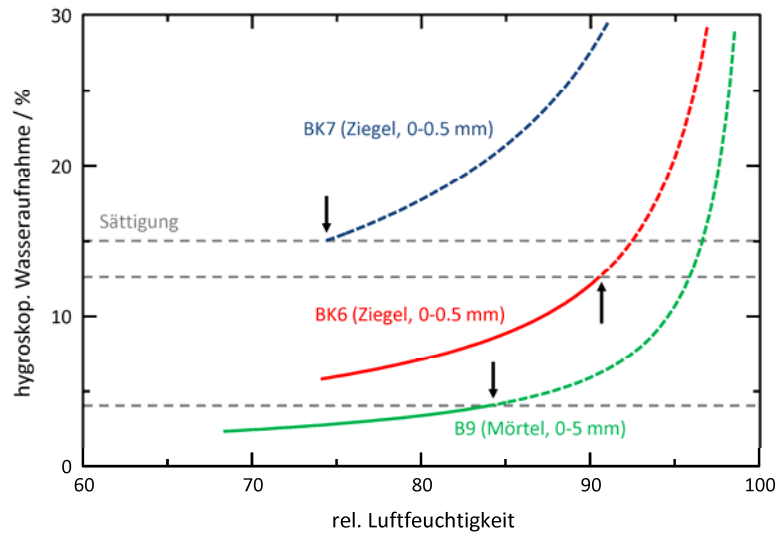


Abb. 41: Hygroskopische Wasseraufnahme als Funktion der relativen Luftfeuchte (RH) bei 20 °C durch die Salzgemische in den oberflächennahen Proben der Bohrungen B9 (Mörtel: 0–5 mm) sowie BK6 und BK7 (Ziegel: 0–0.05 mm). Horizontal gestrichelte Linien sind Schätzungen der maximal möglichen Wasseraufnahme (nach [38]), also des Feuchtegehaltes, bei dem vollständige Sättigung des Porenraums mit den resultierenden Salzlösungen vorliegt (Sättigung ist also ca. bei den mit Pfeilen gekennzeichneten Feuchtegehalten bzw. Luftfeuchten erreicht).

ist. Damit ist aber die Wasseraufnahme nicht abgeschlossen, vielmehr verdünnt sich die Lösung bei zunehmender Luftfeuchtigkeit immer mehr, was zu dem durch die grünen Kurven dargestellten, steigenden Feuchtegehalt mit steigender Luftfeuchtigkeit führt. Bei bekanntem Salzgehalt und bekannter Dichte der Salzlösung ist es möglich, das Volumen der Porenlösung zu berechnen und mit dem aus der maximalen Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck berechneten wasserzugänglichen Porenvolumen zu vergleichen. Die Dichteberechnung erfolgte mit einem Modell [57], das im Rahmen des gleichen von der EU geförderten Projektes entwickelt wurde, aus dem auch das Programm ECOS hervorgegangen ist [50]. Wie in Abb. 41 zu erkennen ist, ist der Porenraum aufgrund der hygroskopischen Wirkung der Salze bereits bei relativen Luftfeuchtigkeit von 84% gesättigt (Pfeil und grüne Kurve). Das bedeutet, dass eine weitere Wasseraufnahme entlang der gestrichelten grünen Kurve bei höheren Luftfeuchtigkeiten aufgrund des begrenzten Porenvolumens nicht mehr möglich ist. In diesem Fall baut sich ein osmotischer Druck auf und Salzlösung wird aus den Poren herausgedrückt.

Je mehr Salz der entsprechenden Zusammensetzung in einer Pore vorhanden ist, desto größer ist die Wasseraufnahme, was dazu führt, dass unter Umständen bei noch niedrigerer Luftfeuchtigkeit die Sättigung des Porenraums erreicht wird. Eine deutliche höhere Belastung mit hygroskopischen Salzen als in der Mörtelprobe B9 liegt in den anderen in Abb. 41 dargestellten Proben BK6 und BK7 vor. Es handelt sich bei beiden Proben um Ziegelproben, die mit Hilfe einer Fräsprobenahme entnommen wurde, die es ermöglicht hat, selektiv den oberflächennahen Bereich bis zu lediglich 0.05 mm Tiefe zu beproben. Da sich Salze bei der Trocknung von Baustoffproben üblicherweise in die-

Tab. 7: Gesamtsalzgehalte (Summe der analysierten Ionen), Gipsgehalte (als $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Chloridgehalte und berechnete hygroskopische Wasseraufnahmen bei 80% und 90% relativer Luftfeuchtigkeit in den jeweils ersten, d.h. oberflächennahen Bohrsegmenten aus Bohrmehl-(B) und Bohrkernentnahmen (BK).

	Ionen %	Gips %	Chlorid %	$W_{\text{hyg},80}$ %	$W_{\text{hyg},90}$ %
B1	4.4	4.3	0.13	1.5	2.5
B2	1.4	0.2	0.53	3.0	5.2
B3	1.5	0.7	0.41	2.4	4.3
B7	1.8	0.9	0.57	3.0	5.1
B9	3.1	2.2	0.50	3.4	5.9
B10	1.7	0.3	0.70	3.8	6.1
B11	1.3	0.5	0.43	2.4	4.1
BK2	15.6	19.5	0.00	0.4	0.6
BK3	2.4	1.2	0.76	4.4	7.3
BK6	3.6	1.3	1.28	7.1	12.1
BK7	7.7	1.7	3.89	17.8	27.6
BK9	9.9	12.2	0.14	1.0	1.8
BK11	27.0	33.7	0.03	0.3	0.5
BK12	5.5	7.0	0.06	0.4	0.7
BK14	10.1	11.7	0.67	3.5	6.2

sem Tiefenbereich besonders stark anreichern, ist diese Probenahmetechnik besonders gut geeignet, um das tatsächliche Ausmaß und die Schadensrelevanz von Salzen unmittelbar an der Oberfläche zu bewerten.

Im Fall der beiden Proben BK6 und BK7 betragen die Gesamtkonzentrationen 3.6% bzw. 7.7%, wie Tab. 7 zu entnehmen ist. Als Gesamtsalzgehalt wird hier die Summe der analysierten sieben Ionen (vier Kationen, drei Anionen) definiert. Ein nicht unerheblicher Teil dieser hohen Salzgehalte besteht aus Gips, im vorliegenden Fall 1.3% bzw. 1.7%. Beim überwiegenden Teil der Versalzung der beiden Oberflächenproben handelt es sich aber um leicht lösliche, d.h. hygroskopische Salze mit dem Hauptbestandteil Natriumchlorid. Als Maß für den Gehalt dieser Salzfraktion ist in Tab. 7 der Chloridgehalt der Proben aufgeführt. Im Fall der Proben BK6 und BK7 beträgt dieser 1.3% bzw. 3.9%. Angesichts dieser enormen Belastung mit hygroskopischen Salzen ist im Vergleich zur Probe B9 zu erwarten, dass bereits bei noch niedrigeren Luftfeuchtigkeiten die vollständige Sättigung erreicht wird. Dies ist allerdings bei Probe BK6 nicht der Fall, die theoretische Porenraumsättigung wird erst bei ca. 90% r.F. erreicht. Die Ursache für die trotz der höheren Salzbelastung vergleichsweise höhere Luftfeuchtigkeit, die zur Sättigung des Porenraums führt, ist die deutliche höhere Porosität der Ziegel im Vergleich zum alten Mörtel. Nach Neumann [38] beträgt die maximale Wasseraufnahme der verwendeten Ziegel bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck ca. 15%

(vgl. Abb. 24, S. 42). Daraus errechnet sich die in der beschriebenen Weise berechnete maximale Feuchtigkeit bis zur Sättigung des Porenraums der versalzene Probe von 90%.

Einen sehr interessanten Fall stellt die noch stärker versalzene Probe BK7 dar. Hier ist die Belastung mit hygroskopischen Salzen (ca. 6% nach Abzug des Gipsanteils) so groß, dass der Porenraum bereits dann vollständig gesättigt ist, wenn die Probe gerade so viel Wasser aufgenommen hat, dass sich die Salze eben vollständig auflösen (vgl. die blaue Kurve in Abb. 41). Im Fall einer solch extremen Versalzung, bei der zusätzlich auch noch eine nicht unerhebliche und bei den Volumenberechnungen noch gar nicht berücksichtigte Gipsmenge im Porenraum vorhanden ist, kann natürlich nicht mehr davon ausgegangen werden, dass das originale Gefüge noch intakt ist, für das im Labor die Wassersättigung bestimmt wurde. Es ist vielmehr sehr wahrscheinlich, dass bereits in erheblichem Umfang eine Gefügezerstörung und damit einhergehend auch eine Vergrößerung des Porenvolumens und damit der maximalen Wasseraufnahme stattgefunden hat. Dies wird durch die in Kap. 4.2.8 vorgestellten mikroskopischen Untersuchungen bestätigt. Die in Abb. 41 dargestellten maximalen Feuchteaufnahmen sind deshalb lediglich Richtwerte.

Eine Zusammenstellung der Salzgehalte und hygroskopischen Feuchteaufnahmen der oberflächennahen Schichten der übrigen Bohrproben aus den Abb. 30–Abb. 33 (vgl. S. 49–52) ist ebenfalls in Tab. 7 dargestellt. Die Werte zeigen, deutlich, dass die hygroskopische Wasseraufnahme durch die Versalzung von Ziegel und Mörtel am Objekt neben der direkten Beregnung eine wichtige Eintragsquelle für Feuchtigkeit ist. Allerdings stellen die beiden zuletzt diskutierten Fälle (BK 6 und BK7) aufgrund der besonders hohen Versalzung extreme Beispiele dar. Hygroskopische Feuchtegehalte in den äußersten Materialsichten in Höhe von ca. 3–6% dürften am Objekt aber die Regel sein.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse der Untersuchungen von Bohrproben, die an der West-, Ost- und Südfassade entnommen wurden, zeigten keinerlei eindeutigen Trend hinsichtlich einer möglichen Expositionsabhängigkeit der Versalzung. Um in dieser Hinsicht weitere Aufschlüsse zu erhalten, wurde zusätzlich zu den bisher beschriebenen Proben auch die in dem unveröffentlichten Bericht [38] aus früheren Untersuchungen am Objekt enthaltenen Daten erneut ausgewertet. Diese Messungen fanden in den Jahren 2008/2009 statt und sollten deshalb mit den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen vergleichbar sein. Leider wurde in der Mehrzahl der Proben lediglich die Konzentration der Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat bestimmt, so dass eine Bilanzierung und fundierte Auswertung des Kristallisationsverhaltens nicht möglich ist. Die in einigen Proben sporadisch durchgeführten Kationenmessungen zeigten so starke Abweichungen in den Ionenbilanzen, dass eine zuverlässige Auswertung nicht möglich ist. Das Hauptproblem bei der Auswertung stellen die offensichtlich viel zu hohen Calciumgehalte dar, die vermutlich durch ungünstige Elutionsbedingungen und daraus folgend eine zu starke Mobilisierung von Calcium aus dem Calcit in den Mörtelproben verursacht ist. Auf eine Auswertung der Kationen wurde deshalb gänzlich verzichtet.

Die Messungen der im Rahmen dieses Vorhabens entnommenen Proben haben aber gezeigt, dass die Salzzusammensetzung im Wesentlichen gut reproduzierbar als ein Gemisch aus Gips und einer hygroskopischen Salzfraktion, deren Hauptbestandteil der Zusammensetzung von Seesalz entspricht, beschrieben werden kann. Wie in Abb. 35 (S. 55) gezeigt wurde, liegt eine sehr hohe Korrelation von Calcium und Sulfat vor und es gibt kaum signifikante Abweichungen vom stöchiometrischen Verhältnis dieser beiden Ionen in Gips. Ebenso zeigen Abb. 37 (S. 58) und Abb. 38 (S. 59), dass eine hohe Korrelation zwischen Natrium und Chlorid und dass mittlere molare Cl/Na-Verhältnis sehr gut mit dem Verhältnis dieser beiden Ionen in Seewasser übereinstimmt. Die wenigen auswertbaren Ionenbilanzen aus dem Bericht [38] bestätigen diesen Befund prinzipiell. Ebenso bestätigt sich auch im Bericht [38], dass die Nitratkonzentrationen am Objekt in der Regel deutlich kleiner sind als die Konzentrationen der beiden anderen Anionen. Für die weitere Auswertung der im Bericht enthaltenen Vertikalprofile wurden deshalb lediglich die Sulfat- und Chlorid-Profile als Tracer für die beiden Hauptbestandteile der Salzgemische ausgewertet.

Vertikalprofile über die gesamte Fassadenhöhe wurden an der West- und Nordfassade bestimmt. Die Positionen der Bohrungen sowie die Gehalte von Sulfat und Chlorid in den jeweils ersten, d.h. oberflächennahen Segmente (0–30 mm) sind in Abb. 42 dargestellt. Es bestätigt sich, dass die beiden Hauptbestandteile des Salzgemisches unabhängig voneinander variieren, was angesichts der unterschiedlichen Quellen, trockene Deposition von Schwefeldioxid für Sulfat bzw. Gips und Eintrag von Seesalz, der unterschiedlichen Löslichkeiten und somit dem unterschiedlichen Transportverhalten der beiden Salzfraktionen nicht überrascht. Die vertikale Verteilung der Salze streut recht stark und ist offensichtlich durch komplexe Transportvorgänge bestimmt, die zu einer Verfrachtung von Salz mit Regenwasser sowohl in größere Tiefen in das Mauerwerk als auch aus den Fassadenbereichen nach unten erfolgt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Schlagregenintensitäten mit zunehmender Höhe deutlich zunehmen [58,59], ist zu erwarten, dass Transportprozesse in größeren Höhen stärker ausgeprägt sein sollten und sowohl zu einem Transport in größere Tiefen als auch zur verstärkten Bildung von Ablaufwasser und Transport in tiefere Fassadenbereiche führen sollte. Die im Treppenaufgang zum Dachboden auf der Innenseite der Westfassade gemessenen Salzprofile scheinen dies zu bestätigen. Sie sind den Profilen auf der Außenseite der Fassade in Abb. 42a gegenübergestellt und weisen eine sehr hohe Versalzung auf, die bestätigt, dass offensichtlich Salztransport quer durch das Mauerwerk stattgefunden hat. Die starken Schäden, zu denen diese hohen Salzgehalte geführt haben, wurden bereits vorgestellt (vgl. Abb. 22, S. 38).

Weitere Vertikalprofile auf der Ost- und Südseite, die von Neumann vorgestellt wurden [38] bringen im Vergleich zu den in Abb. 42 dargestellten Profile keine zusätzlichen Erkenntnisse hinsichtlich der vertikalen Salzverteilung. Die Tiefenprofile entsprechen dem in Abb. 30 und Abb. 31 gezeigten typischen Verlauf.

Abschließend sei noch erwähnt, dass auch das recht seltene Auftreten typischer Frostschäden (vgl. Abb. 22d und Diskussion auf S 38) mit den beobachteten Salzverteilungen gut in Einklang zu bringen sind. Dort, wo hohe Belastungen mit leicht löslichen

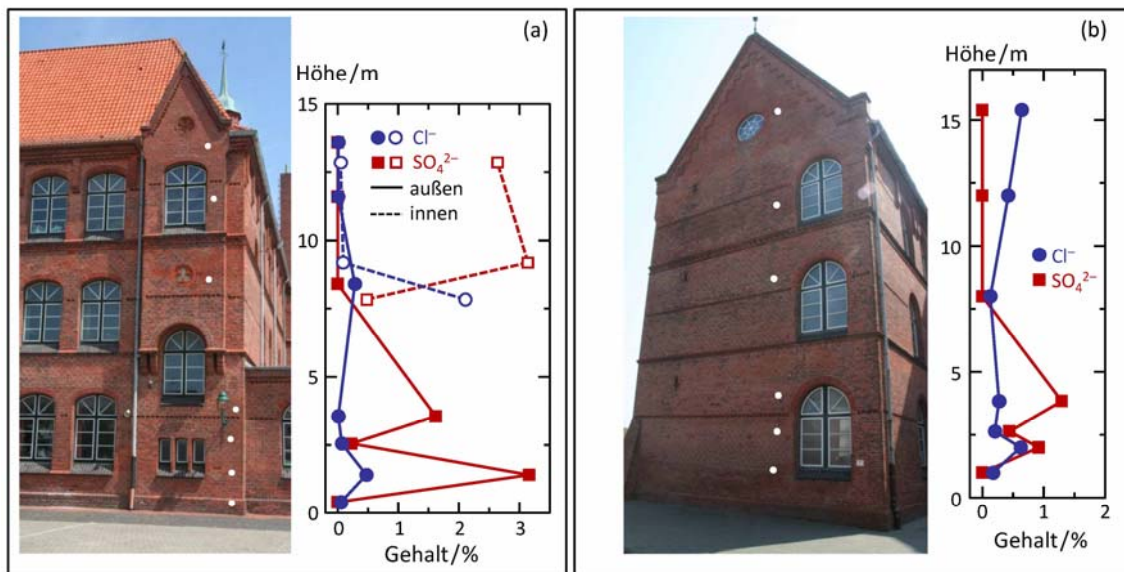


Abb. 42: Vertikalprofile der Sulfat- und Chloridgehalte. (a) Westfassade außen (gefüllte Symbole und durchgezogene Linien, Probenpunkte im Foto) und innen im Treppenaufgang zum Dachboden (weiße Symbole und gestrichelte Linien, ohne Foto); (b) Nordfassade (Probenpunkte im Foto); (Daten aus [38]).

Salzen vorliegen, führt die Gegenwart der Salze zu einer deutlichen Absenkung des Gefrierpunktes, der Werte weit unter 0 °C erreicht [60]. Das Risiko für das Auftreten von Frostschäden sinkt somit stark. An der Grundschule wurde typische Frostschäden nur in großer Höhe beobachtet, wo einerseits geringere Salzanreicherungen vorhanden sind und andererseits die hohen Schlagregenintensitäten zu entsprechender Verdünnung und damit Anhebung der Gefrierpunkte führen, so dass Frostschäden dort wahrscheinlicher sind.

Hinsichtlich der Feuchteverteilung im Mauerwerk wurden bereits von Neumann mehrere Höhenprofile angelegt [38], von denen hier nur diejenigen auf der West- und Nordseite erläutert werden sollen. Es handelt sich um die gleichen Beprobungspunkte wie bei der Messung der Salzprofile (vgl. Abb. 42). Bei diesen Untersuchungen wurden die Feuchtegehalte tiefensegmentierter Bohrmehlproben gravimetrisch bestimmt. In allen Tiefenprofilen wurde eine leichte Zunahme der Materialfeuchte mit zunehmender Tiefe festgestellt. Die Profile verlaufen somit gegenläufig zu den Salzprofilen, wobei der Gradient bei den Feuchteprofilen allerdings deutlich weniger ausgeprägt ist. Für die Bestimmung der vertikalen Feuchteverteilungen wurden deshalb die Horizontalprofile gemittelt. Die resultierenden Vertikalprofile sind in Abb. 43 dargestellt.

Im Höhenprofil auf der Westseite ist zunächst im unteren Fassadenbereich eine Abnahme des Feuchtegehaltes des Mauerwerks aufgrund des abnehmenden Grundfeuchteinflusses festzustellen. Im weiteren Verlauf ist nach oben eine starke Zunahme zu beobachten, wobei in dem obersten Tiefenprofil die größten Feuchtegehalte (10 Mas.%) erreicht werden. Bezogen auf die maximale Wasseraufnahme des Mauerwerks von 12 Mas.% lag zum Messzeitpunkt ein Durchfeuchtungsgrad von bis zu 87%

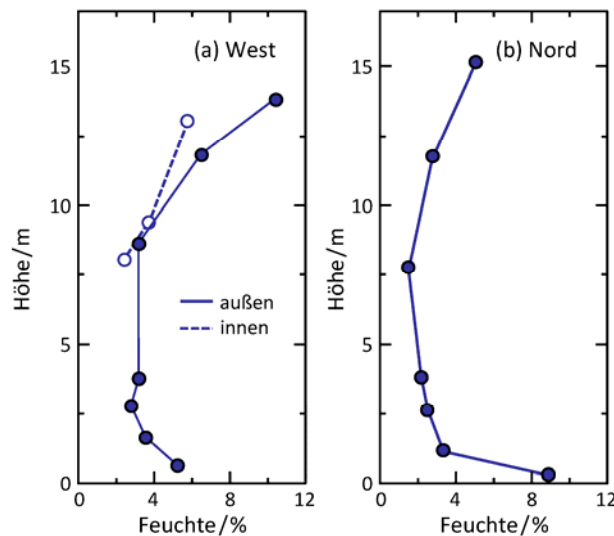


Abb. 43: Vertikalprofile der Materialfeuchten. (a) Westfassade außen (gefüllte Symbole und durchgezogene Linien) und innen im Treppenaufgang zum Dachboden (weiße Symbole und gestrichelte Linien); (b) Nordfassade. Lage der Beprobungspunkte wie in Abb. 42, Daten aus [38].

vor. Aufgrund des recht geringen Gehaltes löslicher Salze im Mauerwerk in dieser Höhe ist dieser Durchfeuchtungsgrad sicherlich nicht als hygroskopische Feuchte zu interpretieren, sondern spiegelt vielmehr die erhöhte Schlagregenbelastung der oberen Fassadenbereiche wider. Dies stimmt auch mit der bereits erwähnten Zunahme der Schadensintensität nach oben überein und damit, dass dort Ziegel typische Merkmale von Frostschäden besitzen, die sonst selten auftreten. Auf der Innenseite der Westfassade wurden im Erker mit dem Wendeltreppenaufgang zum Dachboden ebenfalls Tiefenprofile der Feuchteverteilung aufgenommen, um möglichst den gesamten Wandquerschnitt zu erfassen. Auch dort lässt sich eine Zunahme der Materialfeuchte von der Innenwandoberfläche zum Mauerwerksquerschnitt hin und ebenso von unten nach oben feststellen. Der maximale Durchfeuchtungsgrad bezogen auf die Sättigungsfeuchte des Mauerwerksmörtels beträgt 49%. Auf der Nordseite ist der Trend der Feuchtezunahme zum Mauerwerksquerschnitt weniger eindeutig aber zumeist immer noch vorhanden. Die höchsten Feuchtegehalte finden sich im unteren Bereich als aufsteigende Grundfeuchte nehmen dann bis in 8 m Höhe ab, um dann bis in 15.4 m wieder zuzunehmen, so dass dort ein Durchfeuchtungsgrad von maximale 45% erreicht wird, bezogen auf die Sättigungsfeuchte des Mörtels (Beprobungspunkte s. Abb. 42). Insgesamt ist davon auszugehen, dass die in den unteren Fassadenbereichen, also dort wo die höchsten Salzkonzentrationen erreicht werden, der Feuchtegehalt des Mauerwerks stark durch die hygroskopische Wirkung der Salze bestimmt ist.

4.2.5 Erstes Instandsetzungskonzept und Maßnahmen im Bauabschnitt 1

Das bereits von Neumann angefertigte Gutachten [38] diente der Entwicklung eines Instandsetzungskonzeptes für das Mauerwerk unter besonderer Berücksichtigung der

Salzschäden und der in das Mauerwerk einbindenden und inzwischen stark korrodierten Deckenträger. Die damit in Zusammenhang stehenden mikroskopischen und chemischen Mörtelanalysen wurden bereits dargestellt.

Die hohe Salzbelastung des Mauerwerks aus Natriumchlorid und Gips schließt eine hydrophobierende Imprägnierung als Maßnahme zur Reduzierung der Aufnahme flüssigen Wassers, um zyklische Kristallisation, Auflösung und Rekristallisation des Natriumchlorids zu verhindern, von vornherein aus. Hinzu kommt die besondere Problematik der Hydrophobierung von Denkmälern, für die inzwischen das WTA-Merkblatt 3–17 [61] sehr gut herangezogen werden kann. Danach sollte die Entscheidungsfindung, ob eine Hydrophobierung sinnvoll oder gar schädlich ist, erst nach Beantwortung der Fragen des dargestellten Leitfadens fallen. Zudem sollte die Hydrophobierung danach stets Bestandteil eines integralen Instandsetzungskonzeptes sein. Die Kombination mit einer vorgeschalteten Kompressenentsalzung hätte unter Berücksichtigung der hohen Mobilität des Natriumchlorids auch nicht zu einer ausreichenden Reduzierung der Salzbelastung im Mauerquerschnitt geführt.

Um aufgelockerte Oberflächenzonen unter der sich ablösenden Brennhaut oder nach deren Verlust zu stabilisieren, wurden Laborversuche zur Festigung mit Kieselsäureester mit dem üblichen Wirkstoffgehalt für mineralische Baustoffe vorgenommen. Eine Kontrolle erfolgte vor und nach der Festigung mittels orientierender Bestimmung des dynamischen E-Moduls anhand einer in die Tiefe hoch aufgelösten Ultraschallmessung, wobei die Mindestabstände der einzelnen Messpunkte der Tiefenlinie ca. 2.5 mm betragen und damit deutlich größer sind als z.B. die Dicke der Brennhaut.

Die an den Ausbauziegeln Z1, Z2 und Z3 von der Westseite des westlichen Gebäudeflügels durchgeführten Untersuchungen ergaben eine zu geringe Eindringtiefe, die in Tab. 8 zusammen mit der Wirkstoffaufnahme dargestellt ist, und eine Überfestigung insbesondere im vorderen Bereich der geschädigten Ziegel (Abb. 44). Die kritische Zone der Schalenbildung in Ausbauziegel Z2 oder die mögliche Auflockerung in der Oberflächenzone von Z1 wurde messtechnisch nicht erfasst. Am besten dringt das Festigungsmittel in den makroskopisch intakt erscheinenden Ziegel Z3 ein. Aufgrund der Überfestigung im vorderen Bereich der Ziegel sowie der nicht ausreichenden Auflösung in der Schadenszone der Ziegel, wurde von einer Festigung einzelner Ziegel abgesehen. Daraus ergab sich, dass der Schwerpunkt der Instandsetzungsmaßnahmen der Gebäudehülle im Ziegelaustausch, der Ziegelergänzung sowie vor allem in Erneuerung des Fugennetzes liegen musste.

Tab. 8: Aufnahme des Kieselsäureester-Festigers KSE 300 (Remmers) an Ausbauproben.

Probe	Zustand	Wirkstoffaufnahme / $L \cdot m^{-2}$	Eindringtiefe / mm
Z1	Rückwitterung	0.5	10
Z2	Schalenbildung	1.0	5–6
Z3	Oberfläche intakt	1.4	12–13

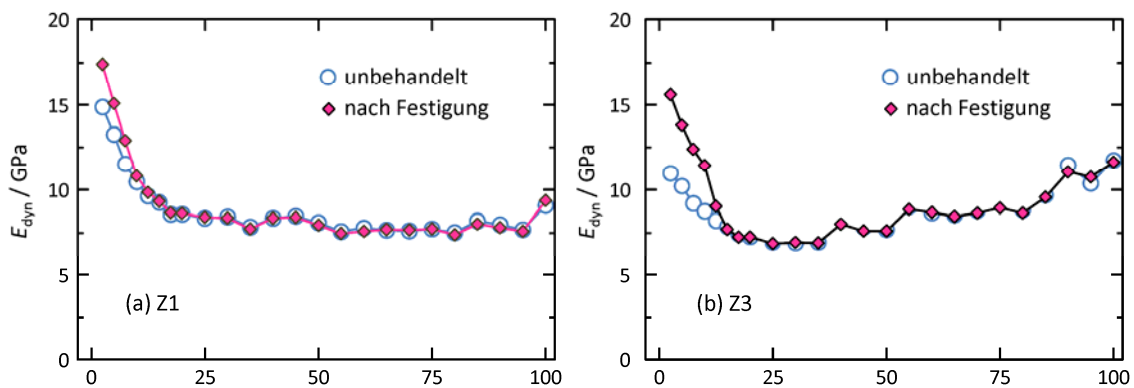


Abb. 44: Festigkeitsprofile (orientierende Bestimmung des dynamischen E-Moduls) der Ausbauziegel Z1 (a) und Z3 (b) vor und nach der Behandlung mit dem Festiger KSE 300 (Remmers).

Um die starke Salzbelastung zu reduzieren und ihre zyklische Auflösung, Mobilisierung und Rekristallisation durch von der Fuge lateral eindringendes Wasser zu verringern, sollte in den Fugen ein Salzspeichermörtel (Remmers) als Tiefenverfugung zum Einsatz kommen. Durch seinen hohen Anteil an Leichtfüllstoffen und Grobporen ist seine kapillare Leitfähigkeit gering. Als Bindemittel wird in diesem Material Zement eingesetzt, da sonst bei der hohen Porosität keine für Ziegelmauerwerk ausreichenden Druckfestigkeiten zu erzielen sind. Zugleich dient der Salzspeichermörtel in Bereichen, vor allem auf der Westseite, in denen sich das kalkige Bindemittel des Mauermörtels bereits zersetzt hat und praktisch keine Eigenfestigkeit mehr besitzt, zur Stabilisierung des Mauerwerks. Aus denkmalpflegerischer Sicht gibt es ebenfalls keine Bedenken gegen die Verwendung eines zementhaltigen Produktes, zumal der ursprüngliche Fugendeckmörtel ebenfalls Zement als wesentliche Bindemittelkomponente enthält.

Als Fugenmörtel sollte ein Material eingesetzt werden, welches eine geringere Festigkeit als der Ziegel besitzt und darüber hinaus eine gute Fugenflankenhaftung aufweist, damit der Wassertransport nicht bevorzugt entlang der Fugengrenzfläche abläuft. Um auch zu randlichen Fehlstellen an den Ziegeln einen optimalen Verbund herstellen zu können, sollte das Material auf Null ausziehbar sein. Aufgrund dieser Anforderungen sowie des großen Spektrums an farblichen und strukturellen Anpassungsmöglichkeiten an den Altbestand, wurde die Anwendung eines Restauriermörtels mit entsprechender objektspezifischer Modifikation vorgeschlagen (Restauriermörtel sk, Remmers). Für dieses Mörtelkonzept sollte eine Musterfläche, einschließlich der farblichen und strukturellen Anpassung eines sehr feinkörnigen Restauriermörtels an die Bestandsziegel als Ziegelantragmasse, angelegt werden.

Da die ausführende Fachfirma dem Bauherren versicherte, dass die Mitarbeiter im Umgang mit diesen Materialien geübt seien und vom Hersteller, auf dessen Produkte zurückgegriffen wurde, auch geschult wurden, verzichtete der Auftraggeber auf das Anlegen einer größeren Musterfläche, da der Zeitraum für Außensanierungen an Gebäuden auf der Insel Norderney auf die vor- und nachsaisonale Zeit im Frühjahr und Herbst eng begrenzt ist.

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens konnte die Umsetzung dieser Maßnahme begleitet werden. Die Fugeninstandsetzung des ersten Bauabschnitts auf der Westseite des östlichen Gebäudeflügels (vgl. Abb. 27, S. 46) ist vergleichend vor und nach Ausführung der Arbeiten in den Abb. 45a und b dargestellt. Das Mauerwerk wirkt nach der Maßnahme optisch heller. Die Abb. 45c zeigt das Ausmaß der Fehlstellen im Fugenmörtel, insbesondere im Bereich der einbindenden Deckenträger, sowie die mörteltechnische Schließung treppenartiger Risse in der Vergangenheit, die sich teilweise bereits wieder geöffnet haben. Durch die komplette Fugeninstandsetzung wurden sämtliche Fehlstellen und Risse geschlossen Abb. 45d.

Bei näherer Betrachtung erweist sich die Fugeninstandsetzung jedoch als nicht ausreichend fachgerecht. Durch die Glättung der Fugenoberfläche mit einem Schlauch liegt zwar in allen einsehbaren Bereichen eine makroskopische Anbindung an die Fugenflanken vor, aber auf der Ziegeloberfläche lassen sich die Spuren der Fugenfräse deutlich feststellen (Abb. 46a). Teilweise wurden beim unachtsamen Entfernen des Fugenmörtels aus den Stoßfugen die jeweils darunter liegenden Ziegel an der Oberkante beschädigt, wie in Abb. 46b beispielhaft gezeigt ist. Weiterhin auffallend sind sehr breite Fugen, deren Höhe im Fall von Lagerfugen bis zu ca. 23 mm betragen kann (Abb. 46c). Gegenüber dem Originalbestand handelt es sich dabei um eine Verdoppelung. Diese bedeutende Fugenverbreiterung aus der Notwendigkeit einer zweimaligen Ausräumung, da der Fugenmörtel zunächst wegen unzureichender Nachbehandlung „verdurstet“ war, stark absandete und wieder entfernt werden musste. Erst danach stellte sich hinsichtlich der Festigkeit ein augenscheinlich zufriedenstellendes Resultat ein. Im Bereich des ersten Bauabschnittes wurde vom Hersteller eine Antragsmasse für die Ziegel an zwei Stellen versuchsweise aufgebracht, die weder hinsichtlich der Farbe noch der Struktur zufriedenstellend war (Abb. 46d).

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde im Bereich des ersten Bauabschnitts ein Sandwichbohrkern aus einer Lagerfuge für die Herstellung eines petrografischen Dünnschliffes entnommen, der in der Übersicht in Abb. 47a darstellt ist. Die Außenseite weist zur linken Bildkante. Während die Anbindung des alten Mauermörtels im rechten Bildbereich an den Ziegel sehr gut erscheint, wie auch die Detailaufnahme Abb. 47b bestätigt, bestehen zwischen dem als Fugenmörtel eingesetzten Restauriermörtel sogenannte durchgehende Blattkapillaren, die für eine hohe Wasseraufnahme entlang der Fugengrenzfläche sorgen. Hier täuscht die augenscheinlich vorhandene Anbindung des Fugenmörtels an die Ziegel in der Ansicht ein besseres Resultat vor als der tatsächliche, nur mikroskopisch zu ermittelnde Zustand.

Zudem findet sich der Salzspeichermörtel lediglich in einem Zwickel zwischen ursprünglichen Mauermörtel und Restauriermörtel und würde damit die ihm zugeordnete Funktion nicht erfüllen. Sowohl die Poren zwischen dem Salzspeicherputz und dem Mauermörtel (Abb. 47c) als auch die Poren zwischen dem Restauriermörtel und dem Salzspeicherputz sind so groß (Abb. 47d), dass der Kapillartransport unterbrochen wird.

Die Wirkung der Salze hinsichtlich der Ziegelschädigung läuft nach Fertigstellung im Jahr 2012 weiterhin ab. Zunächst lassen sich Salzausblühungen an der Oberfläche des Ziegelmauerwerks feststellen, wo vor der Restaurierung keine Ausblühungen sichtbar



Abb. 45: Bauabschnitt 1 (Westseite des östlichen Gebäudeflügels). (a) Übersicht vor der Instandsetzung; (b) Übersicht nach der Instandsetzung; (c) Detail des Mauerwerkszustandes über dem mittleren Fenster im 1. OG; (d) Detail nach der Instandsetzung.

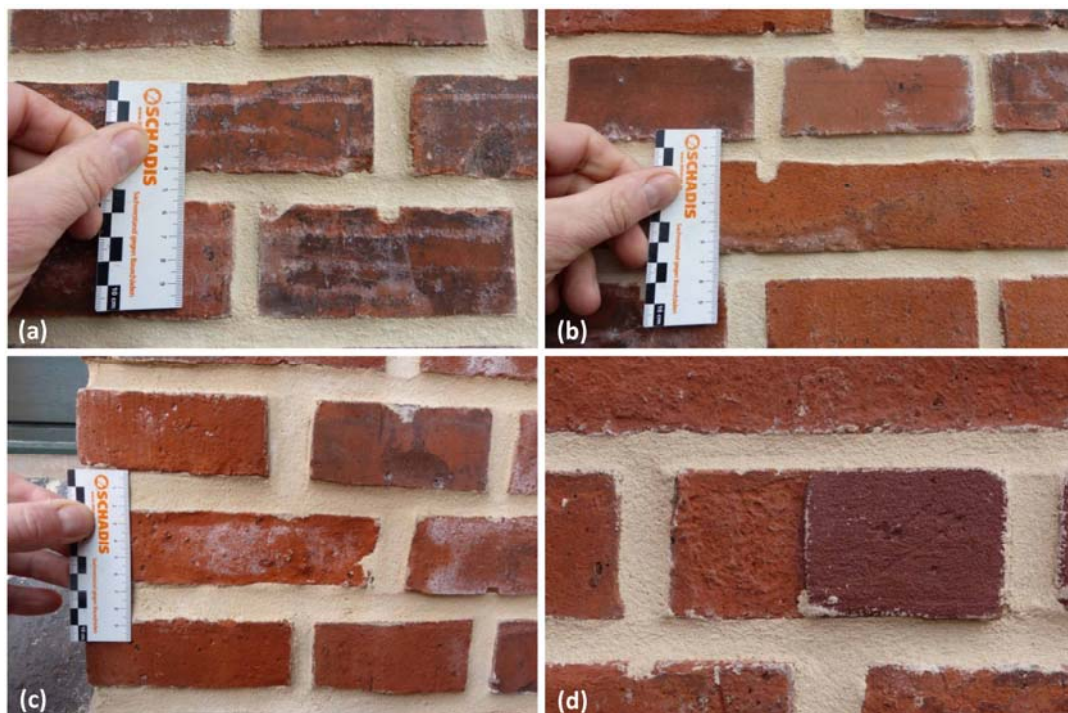


Abb. 46: Zustand nach der Instandsetzung. (a) Spuren der Fugenfräse auf den Ziegeln, (b) Schädigung des Läufers unter einer Stoßfuge; (c) erhöhte Fugenbreiten von teilweise > 20 mm; (d) Versuchsweise aufgetragene Anstrichmasse ohne ausreichende Anpassung an Farbe und Struktur.

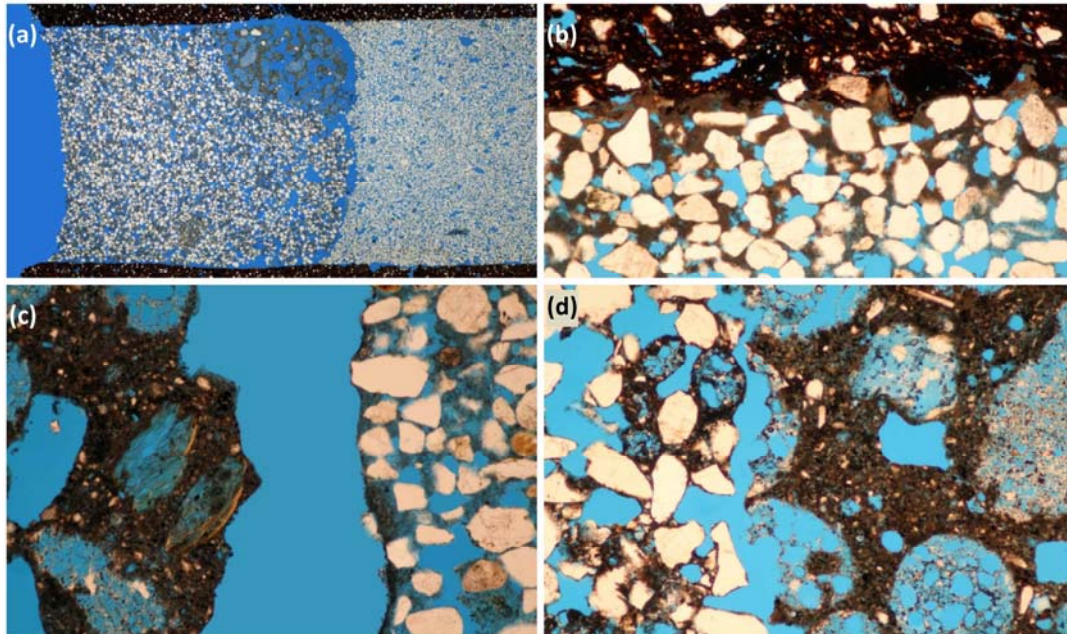


Abb. 47: Dünnschliff eines Sandwichbohrkerns aus der instandgesetzten Fläche. (a) Übersichtsaufnahme, lange Bildkante: 36 mm, parallele Polarisatoren; (b) Kontakt zwischen originalem Mauermörtel (unten) und Ziegel (oben), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (c) fehlender Kontakt zwischen Salzspeichermörtel (links) und Mauermörtel (rechts), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (d) unzureichender Kontakt zwischen Restauriermörtel (links) und Salzspeichermörtel (rechts), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren.



Abb. 48: Fortdauernde Verwitterung nach Instandsetzung des Fugennetzes. (a) Salzausblühungen (vermutlich Gips); (b) kleine Pusteln und Aufbeulungen; (c) Verwitterung von Ziegeln ohne Brennhaut durch zyklische Salzkristallisation; (d) herabgefallene Schuppen von Ziegeln.

waren. Es handelt sich dabei vermutlich um mobilisierten Gips (Abb. 48a). Der weitere Zerfall beginnt an den Ziegeln ohne Brennhaut in Form kleiner, d.h. ca. 1–5 mm großer Aufbeulungen durch Salze (Abb. 48b) und hat an manchen Stellen an stark vorgeschädigten Ziegeln bereits Ausmaße angenommen, die mit dem Zustand vor der Instandsetzung vergleichbar sind (Abb. 48c). Der Materialverlust lässt sich an abgefallenen Schuppen von abwitternden Ziegeln auf dem Belag aus dunkelroten Pflasterziegeln ablesen (Abb. 48d).

Die Veränderung der Konstruktion läuft der Instandsetzung des Mauerwerks voraus. Um die erneute Entstehung von Rissen in der Außenhülle zu verhindern, werden die Deckenträger innen abgefangen, das Mauerwerk von außen im Deckenaufleger geöffnet und die Trägerenden abgetrennt. Innen wurde zunächst hinter dem Treppenfundament aus Ziegeln im Kriechkeller ein weiteres Fundament aus Beton gegossen, um die Lasten von Stahlstützen aufzunehmen, die wiederum als Auflagerpunkte für parallel unter den Decken an der Innenseite der Außenwände verlaufende Stahlträger dienen. Auf letztgenannte lagern die Deckenträger.

Der für den Aufbau der Innenkonstruktion vorbereitete Klassenraum auf der Westseite des Westflügels ist in Abb. 49a in der Übersicht zu dargestellt. Sichtbar sind die Löcher der Kernbohrungen im Fußboden und in der Decke zur Durchführung der Stahlstützen, das Verbindungsloch zum angrenzenden Raum sowie die im zukünftigen Auflagerbereich freigelegten Bestandsdeckenträger. Vor der Wand liegt der neue Träger für die Montage mit einer Hebeeinrichtung bereit. In Abb. 49b wird eine der Stützen aufgerichtet und unter den Träger geschoben.

Mit untereinander verschweißten Lastplatten lagern die Deckenträger auf dem quer dazu verlaufenden vor der Wand angeordneten Träger (Abb. 49c). In diesem Fall ist der Abstand zwischen Deckenträger und Abfangung größer als geplant, wie anhand der großen Anzahl an Lastverteilungsplatten nachvollziehbar ist. Der Zwischenraum wurde mit Kalksandstein geschlossen. Zudem zeigt das Foto die Verschraubung der Stützen mit den Trägern sowie die Verankerung der Stützen in der Außenwand mit Edelstahlankern.

Die Stützen und Träger wurden mit Gipskartonplatten verkleidet und anschließend beschichtet, während die Innenseite der Außenwand mit einem funktionsdifferenzierten Putzsystem versehen wurde (Abb. 49d). Zwischen der Kopfseite der Gipskartonplatten und dem Sanierputz wurde eine Trennlage eingearbeitet, um eine mögliche Feuchtwanderung und Reaktion des zementhaltigen Sanierputzes mit dem Gips zu verhindern.

In den Fluren liegen die anzunehmenden Verkehrslasten unter denen der Klassenräume, so dass geringer dimensionierte Träger verwendet werden konnten. Diese wurden nicht mehr als eigenständige Konstruktion über die gesamte Gebäudehöhe bis in den Kriechkeller geführt, sondern mit Edelstahlankern in dem tragenden Außenmauerwerk befestigt. Abb. 50a lässt die geringere Dimensionierung im fertigen Zustand erkennen. Durch den Verzicht auf ein Sanierputzsystem kam es stellenweise bereits durch von außen eingetragene Feuchtigkeit zur Mobilisierung von vorhandenen Salzen und zu Aufplatzungen bzw. Aufbeulungen des Spachtels und der Beschichtung (Abb. 50b).



Abb. 49: Herstellung der Innenkonstruktion. (a) für den Aufbau der Stahlträgerkonstruktion vorbereiteter Klassenraum; (b) Aufrichten einer Stahlstütze durch „Manpower“; (c) Detail zur Verankerung der Konstruktion an der Decke und im Mauerwerk; (d) Fertiger Zustand nach Verkleidung der Stahlkonstruktion und Beschichtung.



Abb. 50: Fertiggestellte Stahlkonstruktion in den Flur. (a) Geringer dimensionierte Stützen im Flur, (b) erste Schäden entstanden aufgrund des Verzichts auf ein funktionsdifferenziertes Putzsystem.

4.2.6 Wasseraufnahme- und Trocknungsmessungen

Die zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme mittels der Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke hat sich inzwischen für Ziegelmauerwerk als gängiges Messverfahren etabliert, obgleich viele Sachverständige die Wasseraufnahme im Fugenbereich immer noch mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten bestimmen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Franke-Platte in Kombination mit dem Karsten-Röhrchen als integrales Messverfahren für die Ermittlung der Wasseraufnahme des Verbundes und der Ziegel eingesetzt, um entscheiden zu können, wie groß der Unterschied der Wasseraufnahme von Ziegeln mit und ohne Brennhaut ist und ob der Wassertransport vor allem über das Fugennetz und/oder die Fugen-/Ziegelgrenze abläuft oder ob auch die Ziegel einen bedeutenden Beitrag dazu leisten. Statt des handelsüblichen Wassereindringprüfers der Fa. Mohren aus Glas wurde ein Artikel der Fa. Remmers aus Kunststoff verwendet, da bei Herabfallen des Prüfröhrchens kein Zersplittern zu erwarten war.

Da Wasseraufnahmemessungen an der Grundschule bisher nicht durchgeführt wurden, erfolgte zunächst eine Bestandsaufnahme. Die schlagregenabgewandte Ostseite wurde als Referenzfläche für die am besten erhaltenen, ursprünglich verwendeten Fugenmörtel herangezogen. Abb. 51a gibt das Messfeld mit den Messpunkten E-AB-FP1, E-AB-FP2 und E-AB-FP3 sowie E-AB-KR4, E-AB-KR5 und E-AB-KR6 wieder. In der Bezeichnung der Messpunkte bezieht sich der erste Buchstabe auf die Exposition, also Ost (E), West (W), Nord (N) und Süd (S). Die zweite Buchstabenkombination gibt an, ob es sich um Altbestand (AB), Bauabschnitt 1 (BA1) oder um die Musterflächen 1–3 (MU1, MU2, MU3) handelt (vgl. Abb. 27, S. 46). Die dritte Buchstabenkombination bezieht sich auf das verwendete Messverfahren, also auf die Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke (FP), den Wassereindringprüfer nach Karsten (KR), auf die große Karsten-Platte (GK) oder die kleine Karsten-Platte (KK). Die letzte Ziffer gibt die fortlaufende Nummerierung der Messung an.

In Abb. 51b und c sind Risse im Mörtel gegenübergestellt, die sich innerhalb der Messflächen E-AB-FP2 und E-AB-FP3 befinden, die mit der Franke-Platte untersucht wurden. Die Rissbreiten wurden mit einer Messlupe bestimmt. Der abgebildete Rissbreitenmesser musste mit dem Stereomikroskop kalibriert werden, da bei dieser Art von Rissbreitenmessern gerade im unteren Messbereich sehr starke Abweichungen untereinander und auch von der tatsächlichen Rissbreite auftreten können. Bei diesem Exemplar entspricht die Strichbreite von 0.1 mm einer tatsächlichen Breite von 0.3 mm. Der in der Abbildung sichtbare Riss besitzt also eine Breite von ca. 0.1 mm, während die Risse in Abb. 51c zwischen 0.3 und 0.5 mm (kleine Löcher) variieren. In Abb. 51d ist die Messposition E-AB-FP3 beispielhaft dargestellt, bei der ein feiner Fugenflankenabriss unterhalb der Messfläche zusätzlich mit Kitt abgedichtet wurde, um ein mögliches Auslaufen während der Messung zu verhindern. Nach 15 Minuten war es allerdings bereits zu einer unregelmäßigen Hofbildung um die Messfläche gekommen.

Zusätzlich erfolgte für die Auswertung eine grafische Darstellung der Messergebnisse. In den Grafiken, die die Wasseraufnahme mittels Franke-Platte darstellen, wurden zur einheitlichen Darstellung Messungen an intakten Ziegeln und Fugenmörtel immer durch

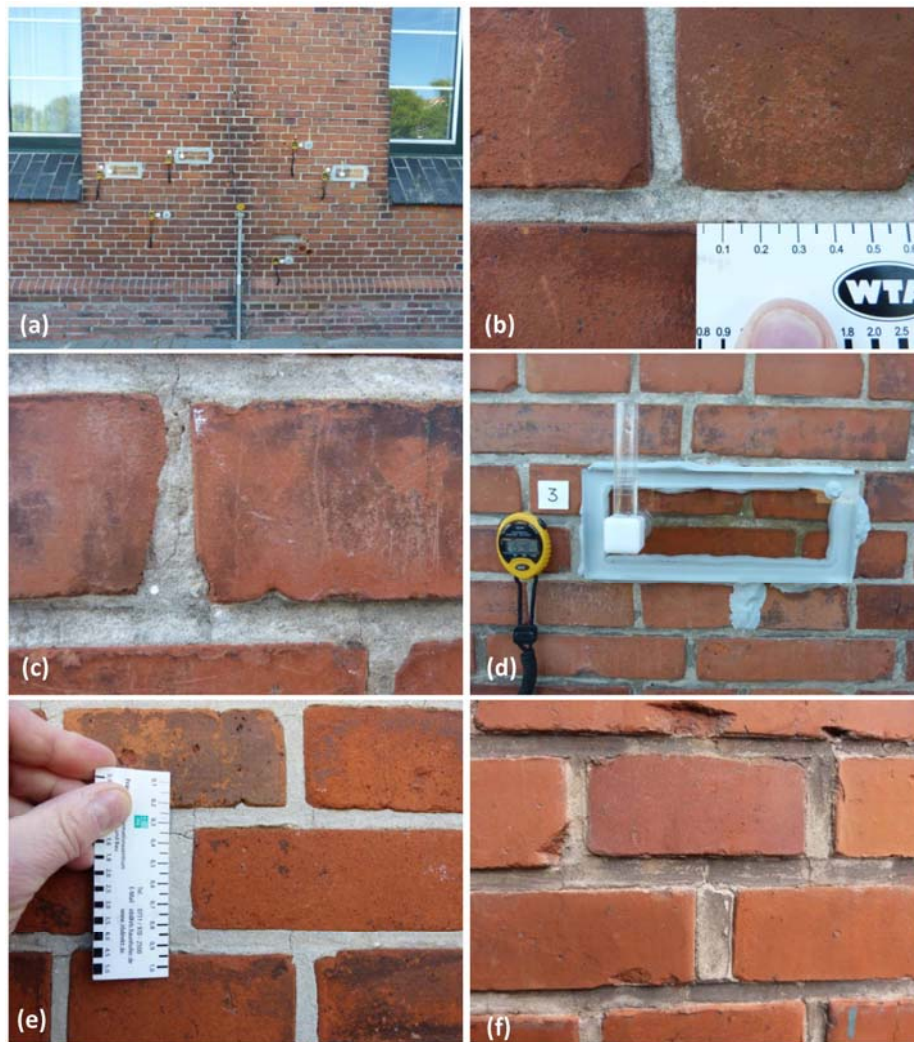


Abb. 51: Zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme im Altbestand mittels Prüfplatte nach Franke und Wassereindringprüfer nach Karsten. (a) Übersicht des Messfeldes (zwischen drittem und viertem Fenster von rechts auf der Ostseite); (b) feiner Haarriss (Messfläche E-AB-FP2); (c) Rissbildung (Messfläche E-AB-FP3); (d) Prüfung der Wasseraufnahme des Verbundes in E-AB-FP3 (Franke-Platte); (e) Rissbildung im Altbestand (Westseite im Bereich von W-AB-FP19 mit oberflächlich abgesandtem Fugenmörtel); (f) Risse im Fugenmörtel (Südseite des Anbaus am Westflügel im Bereich von S-AB-FP1).

durchgehende Linien wiedergegeben. Gestrichelte und gepunktete Linien werden in den Abbildungen bei Rissen im Mörtel bzw. bei Fugenflankenabrissen verwendet, wobei gestrichelte Linien intakte Ziegel und gepunktete Linien Ziegel ohne Brennhaut repräsentieren. Schließlich sind Messpunkte mit intaktem Fugenmörtel aber Ziegeln mit fehlender Brennhaut strichpunktartig dargestellt (vgl. Tab. 9).

Auf der schlagregenabgewandten Ostseite (Abb. 52a) reicht die Wasseraufnahme von 67 bis 245 mL in 15 Minuten, wobei lediglich die Messung E-AB-FP11 nicht die Kriterien von Franke für ein schlagregensicheres Ziegelmauerwerk erfüllt (vgl. Kap. 2.1.2), obgleich noch weitere Messflächen durch Risse im Mörtel bzw. Fugenflankenabrissen gekennzeichnet sind. Die als Dreiecke dargestellten Messwerte stammen aus dem Mau-

Tab. 9: Bedeutung der Linienmuster in Abb. 52, Abb. 60, Abb. 62 und Abb. 63.

Linienmuster	Bedeutung
durchgezogen	Ziegel und Fugenmörtel intakt
gestrichelt	Ziegel intakt, Risse im Fugenmörtel bzw. Flankenabrisse
gepunktet	Ziegel ohne Brennhaut, Risse im Fugenmörtel bzw. Flankenabrisse
strich-punktiert	Ziegel ohne Brennhaut, Fugenmörtel intakt

erbereich zwischen dem ersten und zweiten Fenster von rechts, die durch Kreise dargestellten Messergebnisse aus dem Bereich zwischen dem dritten und vierten Fenster von rechts auf der Ostseite. Grundsätzlich lässt sich die Aussage treffen, dass bis zu einer Rissbreite von ca. 0.1 mm keine erhöhte Wasseraufnahme erfolgt, d.h. diese nach den Kriterien von Franke unter 100 mL in 15 Minuten liegen und damit schlagregensicheres Mauerwerk repräsentieren, wie die Messungen mit intaktem und rissbehafteten Mörteln zeigen. Erst bei größeren Rissbreiten steigt die Wasseraufnahme an.

Auf der Westseite finden sich kaum ursprüngliche Fugenmörtel, die keine Fehlstellen und/oder feine Risse aufweisen. Ein typisches Beispiel für den noch am besten erhaltenen Zustand stellen die Messungen dar, die in Abb. 52b wiedergegeben sind. Der Fugenmörtel lässt aufgrund einer gleichmäßigen geringen Rückwitterung an der Oberfläche keinen Fugeisenabdruck mehr erkennen (Abb. 51e). Die Rissbreiten reichen von 0.1–0.35 mm, wobei die Strichstärken des abgebildeten Rissbreitenmessers den tatsächlichen Zahlangaben entsprechen.

Während auf der Südseite des Anbaus am Westtrakt bei intaktem Verbund die Wasseraufnahme bei ca. 130 mL in 15 Minuten lag (Abb. 52c), konnten über die mörtelinternen Risse und einen Flankenabriss an der Stoßfuge (bis zu 0.3 mm breit) des in Abb. 51f dargestellten Verbundes bis zu 1500 mL Wasser in 15 Minuten in das Mauerwerk eindringen. Allerdings trat nach ca. 10 Minuten auch Wasser aus der Lagerfuge zwei Ziegellagen tiefer aus, so dass eine unkontrollierte Ausbreitung vorlag.

Bei der zerstörungsfreien Prüfung der Wasseraufnahme der Ziegel wurde zwischen Ziegeln mit intakter oder weitgehend intakter Brennhaut und solchen mit rückgewitterter Oberfläche, also ohne Brennhaut unterschieden, wobei die Messung an Ziegeln letztgenannter Kategorie sehr schwierig war, da das Wasser häufig seitlich aus der Messglocke über bereits gelöste Schuppen austrat, obgleich die Oberfläche zunächst einen stabilen Eindruck vermittelte. Beim Abnehmen des Karsten-Röhrchens blieb sehr viel plattiges, bereits vom Untergrund gelöstes Ziegelmaterial am Kitt hängen und bestätigte somit die augenscheinlich zunächst nicht erkennbare, aber bereits vorhandene Schädigung. Bei intakter Oberfläche betrug die Wasseraufnahme in 15 Minuten zwischen 4.3 und 5.1 mL (Abb. 52d), mit einer Ausnahme, in der die Ziegeloberfläche kein Wasser aufnahm. Dies kann entweder durch eine Verdichtung der Oberflächennzone mit Gips oder eine zu

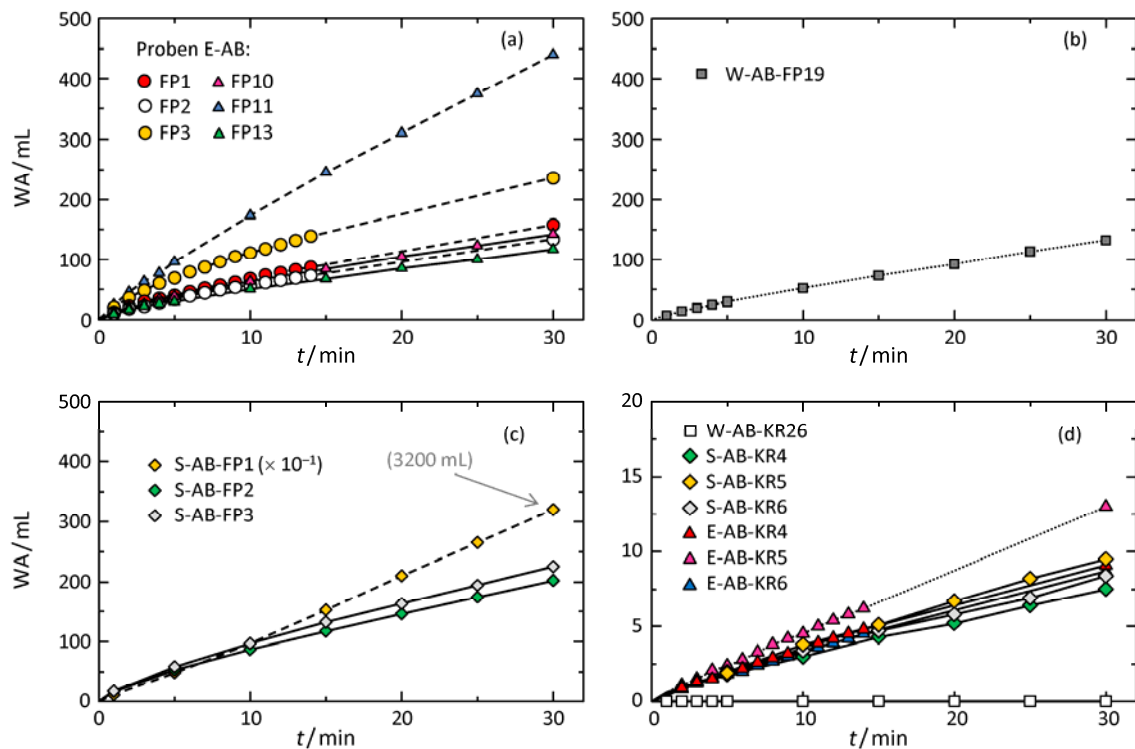


Abb. 52: Wasseraufnahmeproofungen im Altbestand (Prüfplatte nach Frank und Eindringprüfer nach Karsten). (a) Messungen mit Franke-Platte, Ostseite, augenscheinlich intakter Bereich (durchgezogene Linie) und mit Rissen im Fugenmörtel (gestrichelt); (b) Messungen mit Franke-Platte, Westseite, partiell rückgewitterte Ziegeloberfläche und Risse im Fugenmörtel (gepunktet); (c) Messungen mit Franke-Platte, Vergleich der Wasseraufnahme des intakten Verbundes (durchgezogene Linie) mit rissbehaftetem Bereich (gestrichelt); (d) Messung auf Ziegeln mittels Karsten-Röhrchen (W-, E- und S-Seite).

hohe Durchfeuchtung verursacht sein. Ist die Oberfläche geschädigt, steigt die Wasseraufnahme erwartungsgemäß an (E-AB-KR5).

In Ergänzung zu den Messungen im Altbestand wurden Wasseraufnahmemessungen mittels Prüfplatte nach Franke und Wassereindringprüfer nach Karsten auch im fertiggestellten ersten Bauabschnitt (Westseite des östlichen Gebäudeflügels vom Schulhof aus) sowie an unterschiedlichen Musterflächen durchgeführt (vgl. Abb. 27, S. 46, Musterflächen 1–3).

Bei der Musterfläche 1 handelt es sich um eine von der Anwendungstechnik des Produktherstellers nach der ersten fehlgeschlagenen Neuverfugung im ersten Bauabschnitt angelegte Musterfläche auf der Westseite im unteren Teil des Westflügels, die in Abb. 53a in der Übersicht dargestellt ist. Im Vergleich zum ersten Bauabschnitt wurde die Verfugung nicht mit dem Schlauch geglättet, sondern mit dem Fugeisen und zwar mit starkem Anpressdruck, wie es in Abb. 53b anhand der ausgeprägten Spur des Fugeisens nachvollziehbar ist. Ziegelschäden hingegen wurden nicht ausgebessert. Auch hier setzte sich die Verwitterung der Ziegel fort, indem sich durch die zyklische Kristallisation von Natriumchlorid Schalen ausbildeten, wobei sich diese an dem abgebildeten Beispiel bereits wieder aufgelöst hatten (Abb. 53c und d).



Abb. 53: Musterfläche des Herstellers (Musterfläche 1), Westseite Westflügel, unter zweitem Fenster links von NW-Ecke. (a) Übersichtsaufnahme (16.04.2013) mit partiellen Salzausblühungen; (b) Ausschnittvergrößerung (Fugenoberflächen mit Fugeisen geglättet); (c) Fortschritt der Schalenbildung im Bereich der Musterfläche; (d) Detail: deutlich sichtbare Schuppenbildung unter bzw. am Rand der Schale und Rückständen nach Auflösung der Salze.

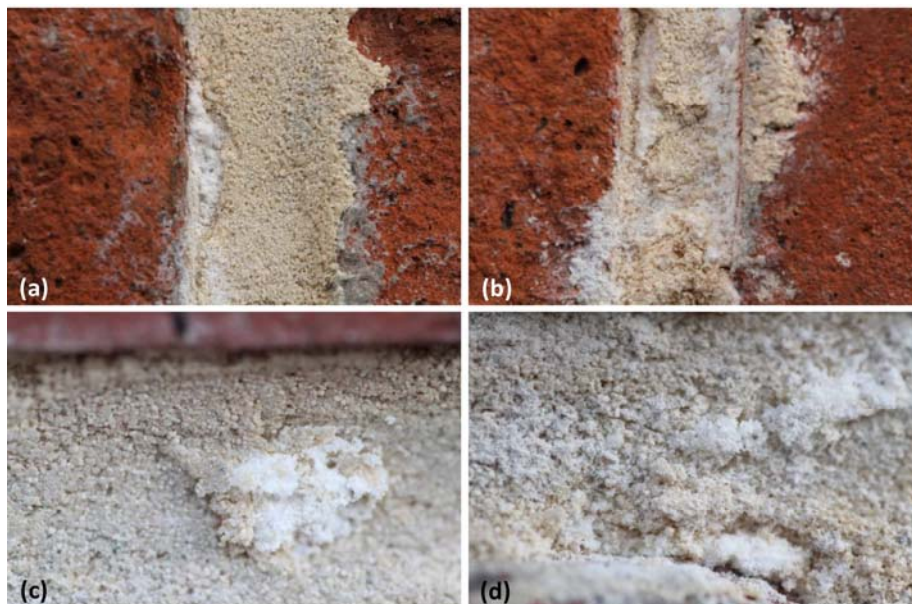


Abb. 54: Salzausblühungen im Bereich der Fugen (Musterfläche 1. (a) Salzkristallisation (Halit) an der Grenzfläche zwischen Ziegel und Fugenmörtel in der Stoßfuge; (b) kleinräumige Zerstörung der Oberflächenzone des Stoßfugenmörtels durch wiederholte Salzkristallisation; (c) Ablösung einer Schuppe aus dem Mörtel einer Lagerfuge durch Salzkristallisation; (d) beginnendes Absanden durch zyklische Salzkristallisation an der Oberfläche einer Lagerfuge.

Durch die erdfeuchte Einbringung des Fugenmörtels kam es nicht zu ausreichender Haftung des Mörtels am Ziegel, so dass der Wassertransport bevorzugt entlang dieser Grenzfläche erfolgte, mit dem Resultat von Salzausblühungen im vorderen Bereich der Fugenflanken (Abb. 54a). Je nach Vorbelastung der angrenzenden Ziegel durch hohe Salzgehalte und der Gefügebildung des Mörtels waren ca. zwei Jahre nach Fertigstellung der Musterfläche bereits erste Schäden in den Fugenmörteln sichtbar, mit einer Zerstörung, die von der Salzkristallisation an den Fugenrändern ausgeht (Abb. 54b). Die beiden Beispiele stammen von den Stoßfugen. Auch im Bereich der Lagerfugen tritt diese Art der Materialzerstörung auf, wobei auch flächige Schäden unterschiedlicher Intensität vorgefunden wurden, wie die beiden Beispiele in Abb. 54c und d bestätigen.

Anhand der Ziegel lässt sich nachvollziehen, dass die Salzkristallisation zu verschiedenen Zeitpunkten an unterschiedlichen Stellen stattfindet, d.h. die zyklisch auftretende Kristallisationsfront wandert nicht nur von außen nach innen, sondern auch lateral. Die Aufnahme in Abb. 55a stammt vom 16.04.2013, während Abb. 55b im Herbst des Jahres, am 26.09.2013, aufgenommen wurde. Zudem wird anhand der beiden Aufnahmen sichtbar, dass der Schaden bereits innerhalb weniger Monate zugenommen hat. Die Detailaufnahme (Abb. 55c) aus der oberen rechten Bildhälfte des vorgenannten Fotos verdeutlicht nochmals den Zerfallsprozess. Das Natriumchlorid wächst stets in das bereits gelockerte Gefüge hinein und drückt Schuppen und kleinteilige Schalen sukzessive vom Rand her aus dem Verbund. Löst sich das Natriumchlorid auf, verbleiben auf der Oberfläche partiell gelöste Schuppen und vor allem Ziegelmehl (Abb. 55d).

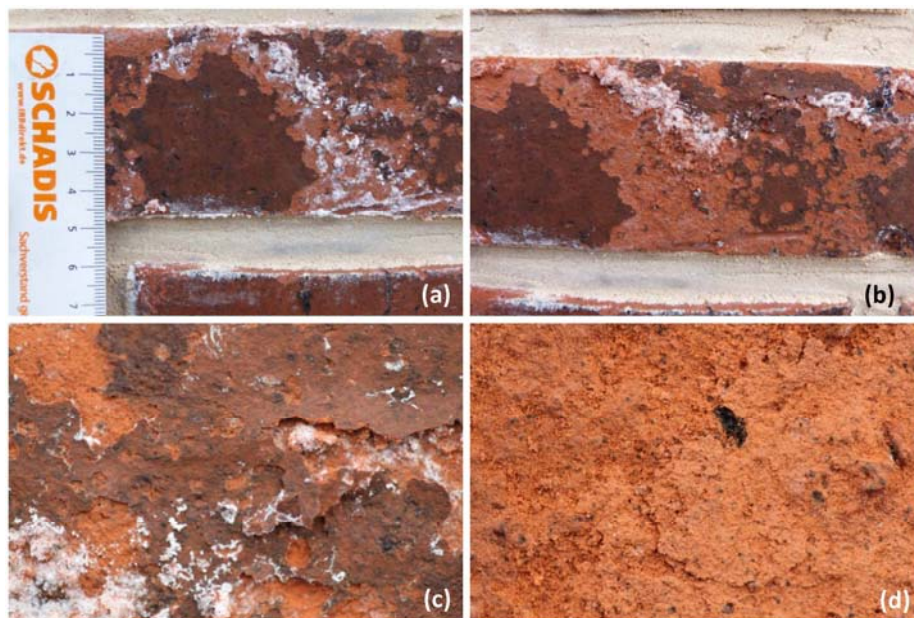


Abb. 55: Salzkristallisation auf/in Ziegeln der Musterfläche 1. (a) Zustand am 16.04.2013: Salzsaum in 2–3 mm Entfernung von noch fest anhaftender Brennhaut am Rand der rechts befindlichen Schadenszone; (b) Zustand am 26.09.2013: der Schaden (Brennhautverlust) ist bereits nach wenigen Monaten weiter fortgeschritten; (c) Detail: Aufwölbung der Brennhaut durch Salzkristallisation; (d) nach Auflösung des Salzes bleiben Schuppen, Ziegelaggregate und Ziegelmehl zurück.

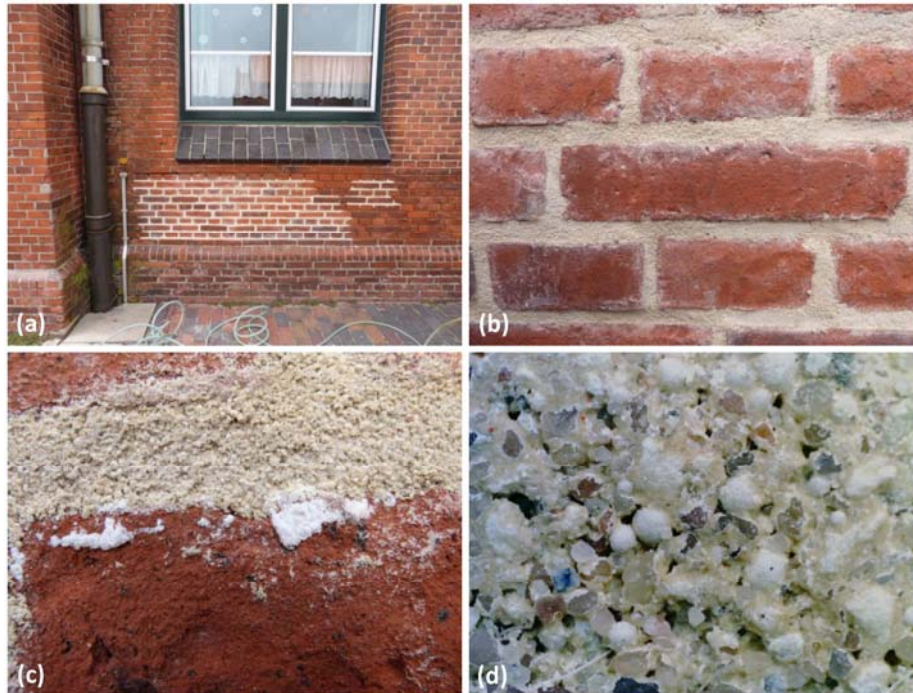


Abb. 56: Durch den Restaurator angelegte Musterfläche mit Salzspeichermörtel eines anderen Herstellers (Musterfläche 2) (Südseite W-Schulhof). (a) Übersicht der Musterfläche; (b) keine ausreichende Glättung des Salzspeichermörtels und Verfärbung der Ziegel durch Bindemittelanteile; (c) Salzausblühungen entlang der Fugengrenzflächen und am Ziegelrand; (d) Fugenoberfläche (Digitalmikroskop, lange Bildkante: 8,5 mm).

Da sich die Maxima der Salzkonzentration bei den Ziegeln in der unmittelbaren Oberflächenzone befinden, wurde anhand einer weiteren Musterfläche der Salzspeichermörtel eines anderen Herstellers (RCP RoCemPlaster GmbH) als alleiniger Verfugmörtel eingesetzt, um nach Möglichkeit die sich vor allem im vorderen Bereich der Ziegel befindlichen gelösten Salze in der Trocknungsphase über die Kapillarporen in den Salzspeichermörtel aufzunehmen und dort in die Grobporen einzulagern. Abbildung 56a vermittelt einen Eindruck von dieser Musterfläche 2 auf der Südseite des westlichen Gebäudetraktes. Allerdings führte die Einbringung des Materials in den Randzonen der Ziegel zu Bindemittelverunreinigungen, die weder mit Kaltwasser- noch mit Heißdampfreinigung zufriedenstellend entfernt werden konnten (Abb. 56b). Auch auf Musterfläche 2 waren nach ca. vier Monaten bereits wieder erste Salzausblühungen am Fugenrand sichtbar. Aufgrund der grobkörnigen Zuschläge, insbesondere der Leichtfüllstoffe, lässt sich die Fugenoberfläche nicht ausreichend glätten und damit nicht der Struktur des Altbestands in ihrem guten Zustand auf der Ostseite anpassen (Abb. 56c), was auch die mikroskopische Aufnahme der Oberfläche mit einem mobilen Digitalmikroskop bestätigt (Abb. 56d).

Um ein Gefüge in der Oberflächenzone analog dem ursprünglichen Fugenmörtel zu erzeugen, wurde bei dem Anlegen einer weiteren Musterfläche durch einen Restaurator auf der Südseite des westlichen Gebäudeflügels nahe der westlichen Ecke wieder auf einen zweilagigen Aufbau zurückgegriffen (Musterfläche 3). Als unterer Mörtel wurde der Salzspeichermörtel von Musterfläche 2 (RCP) eingesetzt und mit einem hydraulischen



Abb. 57: Musterfläche 3. (a) Fugenausräumen mit Pressluftmeißel; (b) Die Wasserreinigung und Vornässen vor der Mörtelapplikation; (c) Abpudern mit Quarzmehl zur Reduktion randlicher Verunreinigung der Ziegel durch Bindemittelanteile des Salzspeichermörtels; (d) Einbringen des Salzspeichermörtels.

schen Fugenmörtel, bestehend aus Flusssand und einem Bindemittel aus natürlichem hydraulischem Kalk und Luftkalk, abgedeckt.

Zunächst wurde der alte geschädigte Fugenmörtel mit einem Pressluftmeißel entfernt und nicht mit einer Fugenfräse wie im ersten Bauabschnitt (Abb. 57a). Nach der Hochdruckreinigung mit Kaltwasser, die zugleich dem Vornässen des Mauerwerks diente (Abb. 57b), erfolgte ein Abpudern der Ziegeloberflächen mit Quarzmehl (Abb. 57c), um eine Verunreinigung der Ziegeloberflächen durch das Bindemittel des Salzspeichermörtels zu minimieren, da eine solche beim Anlegen von Musterfläche 2 auftrat und optisch nicht akzeptabel war. Danach wurde der Salzspeichermörtel mit dem Fugeisen eingebracht (Abb. 57d).

Anschließend erfolgte die Applikation des Fugendeckmörtels mit an den Altbestand angepasstem Farbton (Abb. 58a). Den fertigen Zustand der Musterfläche gibt Abb. 58b in der Übersicht wieder. Durch die unterschiedlich schnelle Trocknung entstand eine starke Scheckigkeit mit einer Aufhellung durch Portlanditbildung an der Oberfläche (Abb. 58b), wobei bereits nach kurzer Zeit eine Carbonatisierung durch den CO_2 -Zutritt aus der Luft stattfand, die zu dem schwerer löslichen Calcit führte. Auch diese Oberfläche war optisch nicht akzeptabel. Neben der Scheckigkeit, die Abb. 58c im Detail zeigt, lassen sich in dieser Aufnahme auch störende Spuren von Bindemittelanteilen an den Ziegelrändern ausmachen, d.h. die Abpuderung der Ziegeloberflächen mit Quarzmehl reichte nicht aus, um dies gänzlich zu unterbinden. Auch bei diesem Aufbau fanden sich an einigen Stellen entlang der Stoßfugen bereits nach wenigen Monaten Salzausblühungen (Abb. 58d).

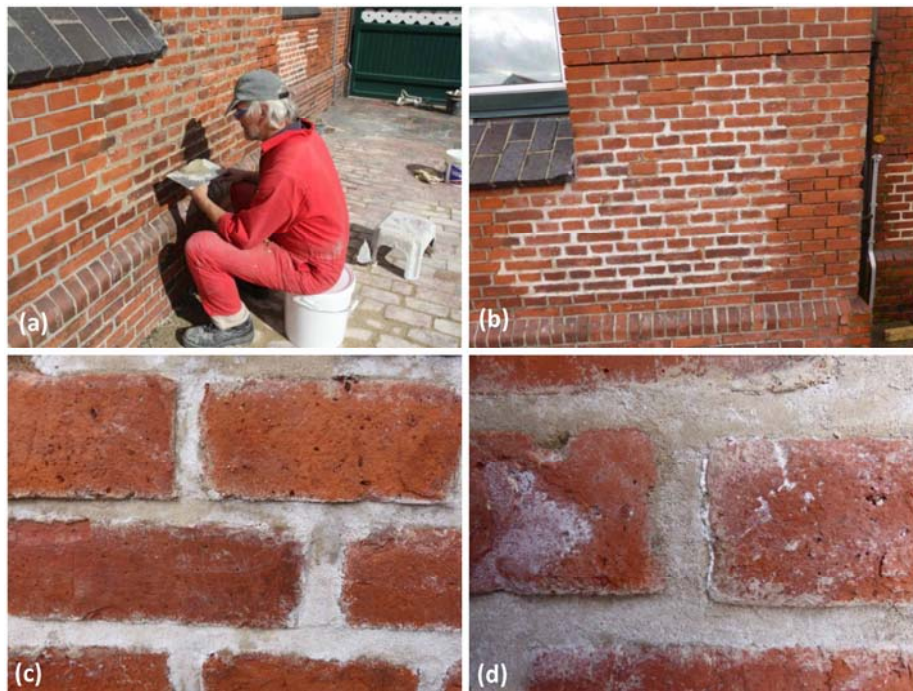


Abb. 58: Fugenmörtel in Musterfläche 3. (a) Applikation des Fugenmörtels; (b) fertige Musterfläche (oben rechts ohne Fugenmörtel, unten rechts ohne Neuverfugung); (c) Detail mit scheckigem Auftrocknen des Fugenmörtels; (d) vereinzelte Salzausblühungen entlang der Fugengrenzflächen.

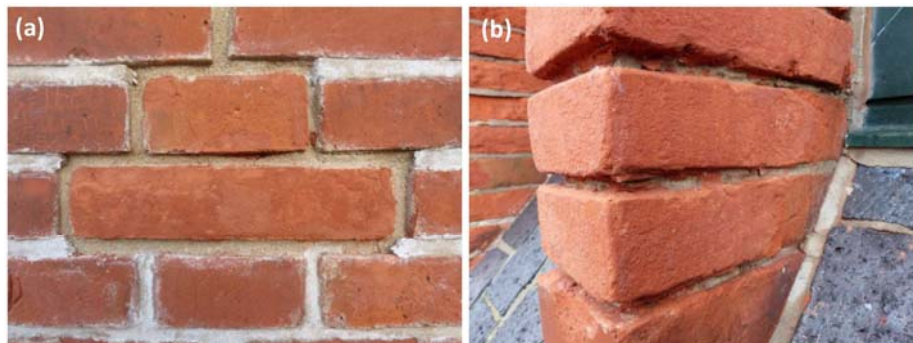


Abb. 59: Ziegelantragungen. (a) Ziegelergänzung in Musterfläche 3; (b) Ziegelantragmasse im Bereich der stark zurückgewitterten Ziegelstützen zwischen den Toilettenfenstern (Erdgeschoss, Westseite).

Im rechten Bereich dieser Musterfläche wurden auch Ziegelränder und -oberflächen mittels farblich angepasster Antragsmassen ergänzt (Abb. 59a), wobei sich diese optisch kaum von der leicht aufgerauten Oberfläche der Ziegel nach dem Verlust der Brennhaut unterscheiden lassen. Eine weitere Ergänzung erfolgte an der Ziegelstütze zwischen den Toilettenfenstern im Erdgeschoss auf der Westseite mit den stark zurückgewitterten Oberflächen (Abb. 59b). Die Ergebnisse der Wasseraufnahmemessungen in Bauabschnitt 1 sowie den beiden Musterflächen 1 und 3 sind in Abb. 60 dargestellt. Versuche im Bereich der Musterfläche 2, welche lediglich mit dem Salzspeichermörtel ausgeführt worden ist, scheiterten. Dort ließen sich die großen WA-Prüfplatten mit dem Kitt nicht

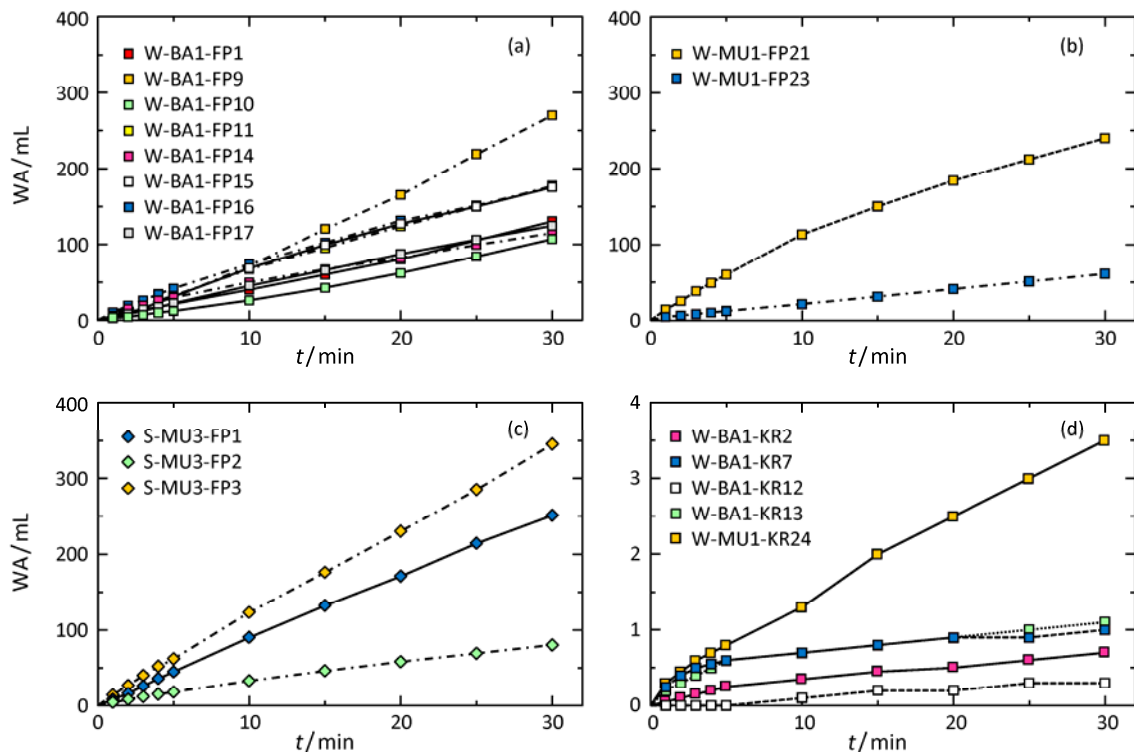


Abb. 60: Wasseraufnahmeprüfungen mittels Franke-Platte und Karsten-Röhrchen. (a) Messungen mit Franke-Platte in Bauabschnitt 1, Bereiche mit intakter Oberfläche (durchgezogene Linien) und rückgewitterten Ziegeloberflächen aber augenscheinlich intaktem Fugenmörtel (strichpunktigte Linien); (b) Messungen mit der Franke-Platte, Musterfläche 1, Bereiche mit Rissen im Fugenmörtel, aber Ziegel mit Brennhaut (gestrichelt) sowie rückgewitterter Ziegeloberfläche aber augenscheinlich intaktem Fugenmörtel (strich-punktiert); (c) Messungen mit der Franke-Platte, Musterfläche 3, Bereiche mit rückgewitterten Ziegeloberflächen aber augenscheinlich intaktem Fugenmörtel (strich-punktiert) und intaktem Verbund (durchgezogene Linie); (d) Messungen mit Karsten-Röhrchen, Ziegel mit und ohne Brennhaut.

abdichten, so dass das Wasser sofort seitlich austrat. Messungen waren deshalb nicht möglich.

Im Bauabschnitt 1 wurden keine Fugenflankenabrissse festgestellt, da der Fugenmörtel nach der Applikation mit einem Schlauch geglättet wurde, so dass praktisch nur zwischen Messflächen mit intakter und geschädigter Brennhaut der Ziegel zu differenzieren war. Nach 15 Minuten Messdauer betrug die Wasseraufnahme 43–120 mL (Abb. 60a) und bei Betrachtung der Messungen ohne oberflächennahe Ziegelschäden sogar nur zwischen 43–100 mL, womit eigentlich die Voraussetzung für eine schlagregensichere Fassade erfüllt wäre. In Abb. 61a ist der Messaufbau bei Messung W-BA1-FP10 mit der kleinsten Wasseraufnahme dargestellt. Für Beibehaltung einer gleichbleibenden Füllhöhe wurde eine Doppelbürette verwendet. Dennoch weisen Salzausblühungen auf der beschichteten und erneuerten Putzoberfläche auf den Innenseiten der Außenwände, insbesondere im Bereich der durchgemauerten Südwestecke und den Leibungen darauf hin, dass die Mobilisierung von leichtlöslichen Salzen und demzufolge auch der Wassertransport als Trägermedium für die gelösten Salze weiterhin möglich ist und unter bestimmten Bedingungen von Außen- und Innenklima auch stattfindet.



Abb. 61: Wasseraufnahmeprüfungen nach Fugenmörtelerneuerung mittels Franke-Platte und mittels großer Karsten-Platte. (a) Franke-Platte mit Bürette im Bauabschnitt 1; (b) Messungen in Musterfläche 3 (Übersicht, 20.11.2013); (c) Messungen auf der Ostseite mit kleiner und großer Karsten-Platte (Altbestand, gleiche Stelle wie Messungen mit Karsten-Röhrchen und Franke-Platte in Abb. 51a; (d) Messungen mit großer Karsten-Platte (Musterfläche 2).

Die beiden Prüfungen im Bereich der Musterfläche 1 auf der Westseite des westlichen Gebäudeflügels (Abb. 60b) lassen tendenziell auf eine größere Spreitung des Spektrums aufgrund der anderen Applikationstechnik schließen (42–150 mL in 15 Minuten). Während bei augenscheinlich intaktem Fugenmörtel ohne interne Risse oder Fugenflankenabriss eine niedrige Wasseraufnahme vorliegt (W-MU1-F23), obgleich die Ziegeloberfläche geschädigt ist, steigt die Wasseraufnahme mit der Entstehung von Fugenflankenabrissen bzw. kleinen Fehlstellen stark an.

Bei der in Abb. 61b dargestellten Musterfläche 3, für die ein Fugendeckmörtel auf Basis eines natürlichen hydraulischen Kalkes verwendet wurde, liegt der größte Wert der drei Messungen mit 176 mL in 15 Minuten über dem von Franke zulässigen Grenzwert für schlagregensicheres Mauerwerk (Abb. 60c), während sich die beiden anderen Messungen noch im zulässigen Bereich einordnen lassen.

Obgleich an den Musterflächen Kontrollmessungen mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten an Ziegeln mit den gleichen Verwitterungsmerkmalen durchgeführt wurden wie an den Bestandsflächen, ist deren Wasseraufnahme sehr viel geringer, unabhängig davon, ob die Brennhaut noch vorhanden ist oder bereits fehlt (Abb. 60d). Da die Messung W-AB-KR26 am Altbestand am selben Tag erfolgte, wie die Messungen W-BA1-KR2, W-BA1-KR7, W-BA1-KR12 und W-BA1-KR13 im Bauabschnitt 1, und ebenfalls in dieser Größenordnung liegt, muss unter Umständen auch die im Porengefüge

vorhandene Feuchtigkeit für eine geringere Wasseraufnahme verantwortlich sein. Nicht auszuschließen ist aber auch eine Verstopfung der Kapillarporen durch Salze, die zu der Verringerung der Wasseraufnahme geführt haben.

Am Altbestand auf der Ostseite erfolgte analog zu den Messungen mit der WA-Prüfplatte nach Franke auch eine Prüfung der Wasseraufnahme mit einer großen Karsten-Platte, mit einem Durchmesser von 10 cm, die stets eine Messung im kritischen Kontakt zwischen Stoß- und Lagerfuge ermöglicht (Abb. 61c), während die kleine Karsten-Platte mit einem Durchmesser von 4 cm deutlich größer ist als das klassische Karsten-Röhrchen, um die Wasseraufnahme des Ziegels zu messen. In den beiden Messfeldern auf der Ostseite reicht die Wasseraufnahme von 30–80 mL in 15 Minuten und ist damit kleiner als bei der Franke-Platte. Sämtliche Messungen, die im intakten Verbund durchgeführt wurden, zeigen geringere Wasseraufnahmen als bei Vorliegen von Rissen bzw. Fehlstellen im Mörtel (Abb. 62a).

Bei den Messungen auf der Westseite im Altbestand (Abb. 62b) reichen die Messwerte von 12–86 mL in 15 Minuten, wobei zwischen dem ursprünglichen Fugenmörtel (W-AB-GK6, W-AB-GK20) und einem in der Vergangenheit zur Ausbesserung verwendeten Fugenmörtel (W-AB-GK1–4) zu differenzieren ist. In Bereichen mit stark geschädigten Ziegeln lässt sich die Wasseraufnahme des Verbundes nicht bestimmen, da selbst diese Messplatten randlich entlang der abschuppenden Ziegelbestandteile auslaufen. Bei noch intakten Ziegeln, aber bereits vorhandenen Fugenflankenabrissen, findet eine hohe Wasseraufnahme statt (W-AB-GK1). Selbst Bereiche mit geschädigten Ziegeln und Altfugenmörtel nehmen weniger Wasser auf, was aber im Vergleich mit den Messwerten auf der Ostseite zu relativieren ist. Unter Berücksichtigung des Schadensbildes zwischen Partien mit ursprünglichem Fugenmörtel und Ausbesserungsmörtel bestätigen die Wasseraufnahmeprüfungen auf der Westseite die Auswahl des falschen Fugenmörtels für die damalige Teilinstandsetzung des Fugennetzes.

Im Bauabschnitt 1, der keine Fugenflankenabrisse oder Risse im Mörtel aufweist, lässt sich nachvollziehen, dass die Wasseraufnahme bei geschädigten Ziegeln stark ansteigen kann (Abb. 62c), während im Bereich der Musterfläche 1 auch ohne sichtbare Schäden im Einzelfall eine hohe Wasseraufnahme festgestellt werden konnte (Abb. 62d). Die stärkste Wasseraufnahme erfolgt im Bereich von Musterfläche 2 auf der Südseite des Anbaus am Westflügel (Abb. 61d), da auf einen Deckfugenmörtel verzichtet wurde, obwohl durch die Art der Verarbeitung keine größeren randlichen Poren oder Blattkapillaren sichtbar waren (Abb. 62e). Die geringste Wasseraufnahme wurde im Bereich der Musterfläche 3 ermittelt (Abb. 62f).

Mit der kleinen Karsten-Platte lässt sich die Wasseraufnahme einer größeren Ziegelfläche bestimmen als mit dem klassischen Karsten-Röhrchen, wobei mit einem Durchmesser von 4 cm bei Ziegelhöhen von zumeist 5 cm die maximale Größe erreicht wird, ohne dass Randeinflüsse die Messung stark beeinflussen. Erst mit zunehmender Messdauer wurden im Einzelfall „Hofbildungen“ beobachtet, die über den Ziegel hinausreichen. Die größte Wasseraufnahme wurde auf der Ostseite an einem Ziegel mit Einritzungen von Schülern, die die Brennhaut tiefgreifend geschädigt hatten, bestimmt (Abb. 63a).

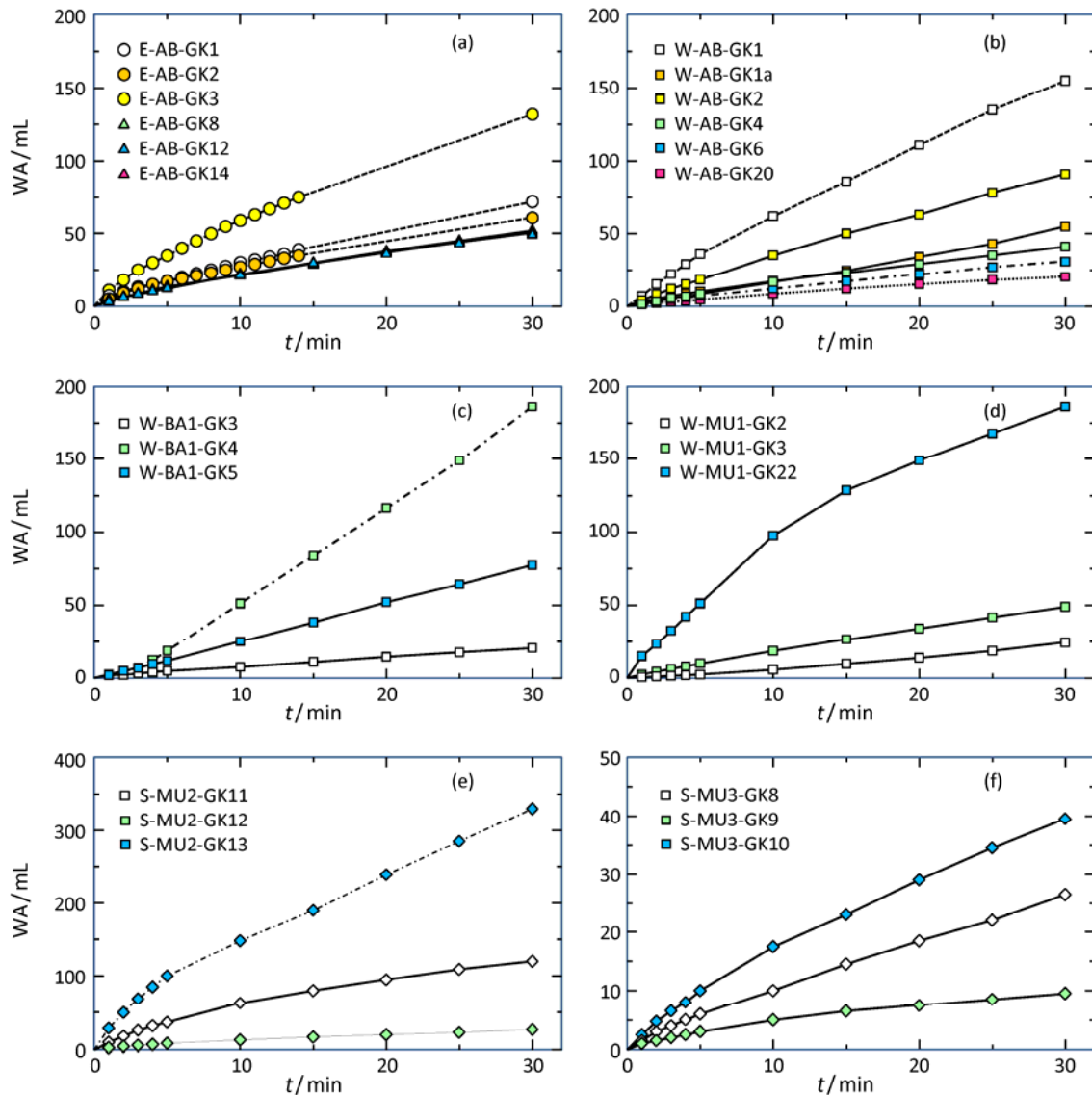


Abb. 62: Wasseraufnahmeproofungen mittels der großen Karsten-Platte. (—): Ziegel und Fugenmörtel intakt, (---) Ziegeloberfläche intakt aber (Flankenab-)Risse im Fugenmörtel, (···) Ziegel ohne Brennhaut und Risse im Fugenmörtel, (-·-·-) Ziegel ohne Brennhaut, Fugenmörtel intakt. Messungen am Altbestand auf Ostseite (a) und der Westseite (b) sowie Messungen im Bauabschnitt 1 (c), Musterfläche 1 (d), Musterfläche 2 (e) und Musterfläche 3 (f).

Auf der Westseite war die Wasseraufnahme selbst bei einem Ziegel mit rückgewitterter Brennhaut geringer (W-AB-KK27). Der andere Messpunkt (W-AB-KK3) wies innerhalb der Messfläche noch eine Brennhaut auf, während am Ziegelrand bereits Fehlstellen vorhanden waren. Da die beiden Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten (16.04.2013 und 17.09.2014) durchgeführt wurden, ist eine temporäre Durchfeuchtung, die praktisch die Wasseraufnahme verhindert, unwahrscheinlich, zumal bei Betrachtung der anderen Messungen vom 16.04.2013 (W-BA1-KK4 und W-MU1-KK25) höhere Wasseraufnahmen zu verzeichnen sind (Abb. 63a).

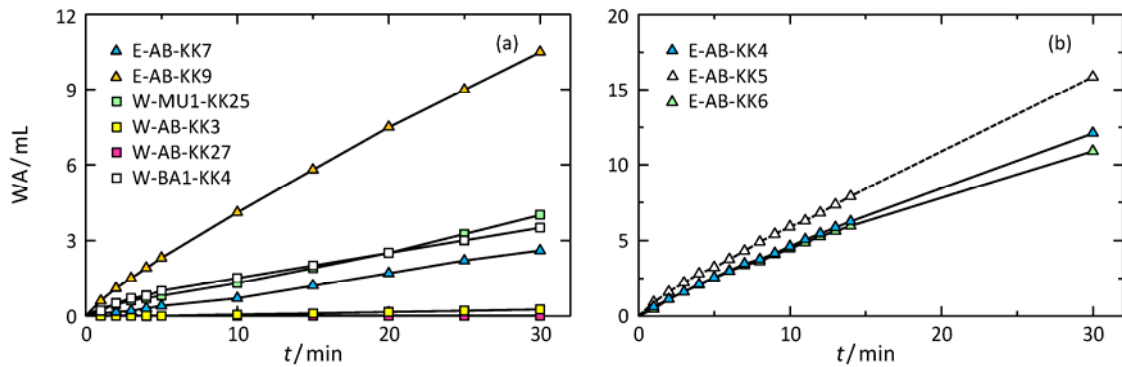


Abb. 63: Wasseraufnahmeproofungen mittels kleiner Karsten-Platte. (—): Ziegel und Fugenmörtel intakt, (---) Ziegeloberfläche intakt aber (Flankenab-)Risse im Fugenmörtel. (a) Vergleichende Messung der Wasseraufnahme von Ziegeln unterschiedlichen Verwitterungszustandes im Altbestand auf West- und Ostseite, im Bauabschnitt 1 sowie in Musterfläche 1. (b) Vergleichsmessungen mit der kleinen Karsten-Platte zu Messungen da am Tag zuvor mit dem Prüfröhrchen an gleicher Stelle ausgeführt wurden (vgl. Abb. 52d).

Ein Vergleich von Messungen auf Ziegeln und dem Verbundmauerwerk an zwei aufeinanderfolgenden Tagen ist in Abb. 63b dargestellt. Nach Prüfung der Wasseraufnahme der Ziegel mit dem Karsten-Röhrchen (s. Abb. 52d, A-AB-KR4–6, 7.5–9.5 mL in 30 Minuten) erfolgten nach ausreichender Trocknung am nächsten Tag an gleicher Stelle Messungen mit der kleinen Karsten-Platte (Abb. 63b). Ein analoger Vergleich wurde unter Verwendung der Franke-Platte und der großen Karsten-Platte durchgeführt. Die mit der großen Franke-Platte gemessenen Wasseraufnahmen E-AB-FP1–E-AB-FP3 (Abb. 52a, S. 82) können mit den am darauffolgenden Tag mittels großer Karsten-Platte bestimmten Wasseraufnahmen E-AB-GK1–3 (Abb. 62a) verglichen werden. Bei allen genannten Vergleichen sind die Abstände der Wasseraufnahmekurven nahezu identisch, so dass sich die Kombination von großer und kleiner Karsten-Platte generell als kombiniertes Verfahren für sämtliche Ziegelformate sowie Ziegelverbände eignet und damit eine Vergleichbarkeit gewährleistet, ohne dass Wasseraufnahmen in einen fehlerbehafteten Wasseraufnahmekoeffizienten umgerechnet werden müssen.

Abschließend sei noch ein Vergleich zwischen großer Karsten-Platte und Franke-Platte an nebeneinander liegenden Messpunkten bei gleichem Schadensbild erwähnt. Zu diesem Zweck können die Messungen W-AB-FP19 (Abb. 52b, S. 82) und W-MU1-FP21 (Abb. 60b, S. 88) mit den Messungen W-AB-GK20 (Abb. 62b) und W-MU1-GK22 (Abb. 62d) verglichen werden. Dabei bestätigt sich die Erwartung, dass stets höhere Wasseraufnahmen mit der Franke-Platte bestimmt werden. Die Messungen erfolgten im Bereich der Musterfläche 1 auf der Westseite und im Altbestand unmittelbar daneben. Obwohl Risse im Fugenmörtel des Altbestandes auftraten und die Ziegeloberflächen zurückgewittert waren, war die Wasseraufnahme bei den augenscheinlich intakten Ziegel- und Fugenmörteloberflächen der Musterfläche sehr viel größer.

Während verschiedener Messkampagnen wurden auch Messungen an der Grundschule mit der kombinierten Messkammer zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und des Trocknungsverhaltens durchgeführt. Einige Messergebnisse, die in einem Be-

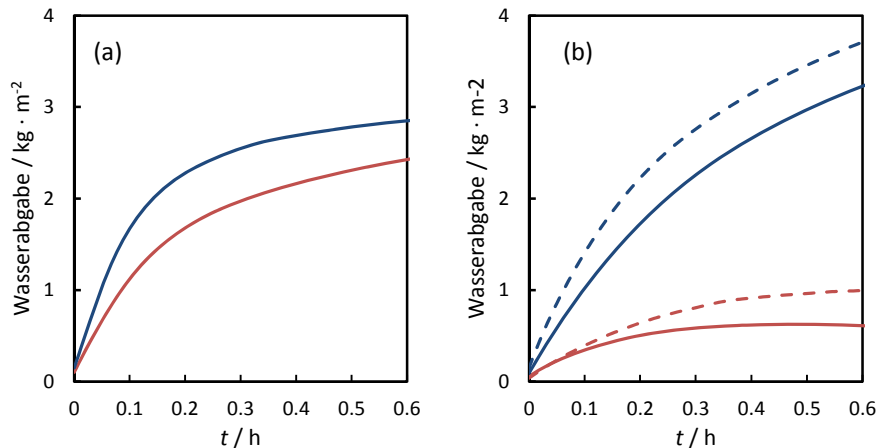


Abb. 64: Trocknungsmessungen im Altbestand (Westfassade). (a) Wasserabgabe im Bereich mit Ziegeln mit intakter Brennhaut (rot) und weitgehend zurückgewitterter Oberfläche (blau); (b) Wasserabgabe bei Durchströmung der Kammer mit Umgebungsluft (ca. 55% r.F., rot) und mit trockener Luft (< 10%, blau). Gestrichelten Linien stellen Wiederholungsmessungen dar.

reich des Altbestandes neben Musterfläche 1 durchgeführt wurden, sind in Abb. 64 dargestellt. Es wurden jeweils Messungen wie in Kap. 2.1.3 beschrieben durchgeführt (vgl. Abb. 11, S. 19). Zunächst wurde das Mauerwerk kapillar mit Wasser gesättigt, indem die entsprechende Rückwand verwendet wurde. In diesem Zustand entsprechen die Abmessungen der Kammer genau der großen Karsten-Platte. Anschließend wurde die Rückwand ersetzt und die Kammer wurde zur Trocknungsmessung verwendet. In Abb. 64a ist eine Vergleichsmessung in Bereichen mit unterschiedlichem Zustand der Ziegeloberflächen dargestellt. Die rote Kurve beschreibt die Wasserabgabe in einem Bereich mit intakter Brennhaut, während die blaue Kurve die Trocknung in einem Bereich mit rückgewitterter Ziegeloberfläche beschreibt. Erwartungsgemäß erfolgt die Trocknung bei Verlust der Brennhaut schneller.

In Abb. 64b ist der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf das Trocknungsverhalten dargestellt. Die roten Kurven beschreiben die Trocknung bei Durchströmung der Kammer mit Umgebungsluft, die zum Zeitpunkt der Messungen eine Luftfeuchtigkeit von ca. 55% aufwies. Die blauen Kurven beschreiben die Wasserabgabe bei Durchströmung der Kammer mit Luft, die in einem mit einem Zeolithen befüllten Trockenturm vorge-trocknet wurde (< 10% r.F.). Auch diese Messung erfüllt die Erwartungen und zeigt eine höhere Trocknungsrate unter trockeneren Bedingungen. Die gestrichelten Kurven sind Wiederholungsmessungen. Dabei verblieb die Messkammer an der gleichen Position und nach der abgeschlossenen ersten Trocknung wurde direkt eine zweite Wasseraufnahme durchgeführt und anschließend erneut getrocknet. Die erhöhte Wasserabgabe bei der Wiederholungsmessung ist vermutlich auf restliches Wasser im Mauerwerk durch eine unvollständige Trocknung während der ersten Messung zurückzuführen.

Eine weitere Vergleichsmessung ist in Abb. 65 dargestellt. Dargestellt sind Trocknungskurven bei einer Messung im Altbestand der Westfassade (gleicher Bereich wie in Abb. 64) und bei einer Messung im Bauabschnitt 1. Hier sind die Trocknungskurven vor allem das Ergebnis der sehr unterschiedlichen Mörtel Eigenschaften. Auch bei diesen

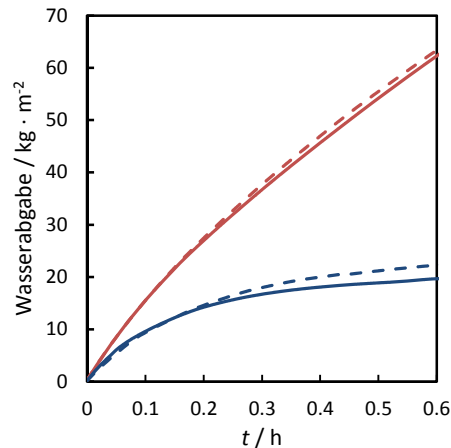


Abb. 65: Vergleich des Trocknungsmessungen im Altbestand der Westfassade (blau) und in Bauabschnitt 1 (rot). Gestrichelten Linien stellen Wiederholungsmessungen dar.

Messungen wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt, die in diesem Fall eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit aufweisen, vermutlich aufgrund der längeren Trocknungszeit.

Die Messungen in Abb. 64 und Abb. 65 belegen, dass die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Kammer sinnvoll am Objekt eingesetzt werden kann, um das Trocknungsverhalten vergleichend zu untersuchen. Um die ermittelten Trocknungsgeschwindigkeiten aber absolut einordnen zu können, fehlen momentan noch Vergleichsdaten. Beispielsweise belegt der Vergleich der Messungen im Altbestand in den beiden Abbildungen, dass es einen enormen Temperatureinfluss gibt. Die blaue Kurve in Abb. 65 wurde beispielsweise bei 30 °C aufgenommen und ergibt eine um den Faktor sechs schnellere Trocknung als bei den Messungen in Abb. 64, die bei 15 °C aufgenommen wurden. Hier wird es zukünftig nötig sein, nach und nach eine bessere Vergleichsdatenbasis zu schaffen.

Generell ist zu konstatieren, dass Trocknungsmessungen mit einem erheblich größeren Messaufwand verbunden sind als Wasseraufnahmemessungen (vgl. Abb. 11, S. 19), weshalb sie sicherlich nicht routinemäßig in vergleichbarem Umfang durchgeführt werden können. Auch in diesem Vorhaben war die Gesamtzahl der Messungen während der begrenzten Zahl von Messkampagnen limitiert. Dies war u.a. auch die Folge von Schwierigkeiten beim Einsatz des Verfahrens, die sich vor Ort zeigten. Aufgrund des höheren Gewichtes ist die Befestigung der Kammer mit Dichtmasse kritischer als bei Verwendung als Karsten-Platte. Gelegentlich traten während der Trocknung Probleme mit der Luftabführung auf, die konstruktiv durch eine Vergrößerung der Querschnitte beseitigt werden müssen. Die Verwendung der Kammer bei direkter Sonneneinstrahlung ist nicht möglich, da es aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Mauer zur Kondensation des verdunsteten Wassers in der Kammer kommt. Aufgrund des recht hohen Messaufwands sind auch Messungen in größerer Höhe an einer Fassade sehr aufwendig und erfordern Veränderungen am derzeitigen Aufbau. Schließlich kann die Messkammer derzeit nicht netzunabhängig betrieben werden.

4.2.7 Bohrhärtewiderstandsmessungen

Erste Messungen des Bohrhärtewiderstandes des ursprünglichen Fugenmörtels bis in den Mauermörtel hinein wurden auf der Ostseite durchgeführt, zumal in diesem Bereich der augenscheinlich beste Erhaltungszustand vorliegt (Abb. 66). Ausgewählt wurde der Bereich, an dem auch andere Untersuchungen zur Ermittlung von Kenndaten und des Istzustandes durchgeführt wurden (vgl. Fehlstellen durch Beprobung im Foto). Die Messungen erfolgten ausschließlich im Bereich der Lagerfugen, um die Variationsbreite der Festigkeitsprofile erfassen zu können, zumal auf der Ostseite nur geschädigte Fugenmörtelstellen ersetzt werden sollen, was der denkmalpflegerischen Zielsetzung entspricht, soviel an Originalsubstanz zu sichern und zu erhalten, wie möglich. Allein aus den Tiefenprofilen der Bohrwiderstandsmessungen lassen sich einige wesentliche objektspezifische Kenntnisse gewinnen:

- der ursprüngliche Fugenmörtel ist deutlich härter als der Mauermörtel, welcher nur noch eine geringe oder gar keine Festigkeit mehr aufweist
- der Fugenmörtel hat eine Stärke von ca. 6–11 mm, im Mittel 8.5 mm
- im unmittelbaren Oberflächenbereich besitzt der Fugenmörtel eine höhere Festigkeit

Letztgenanntes Ergebnis spiegelt die stärkere Verdichtung des Mörtels in der unmittelbaren Oberflächenzone durch das Fugeisen wider und ist teilweise auch das Ergebnis von Lösungs- und Umkristallisationsvorgängen.

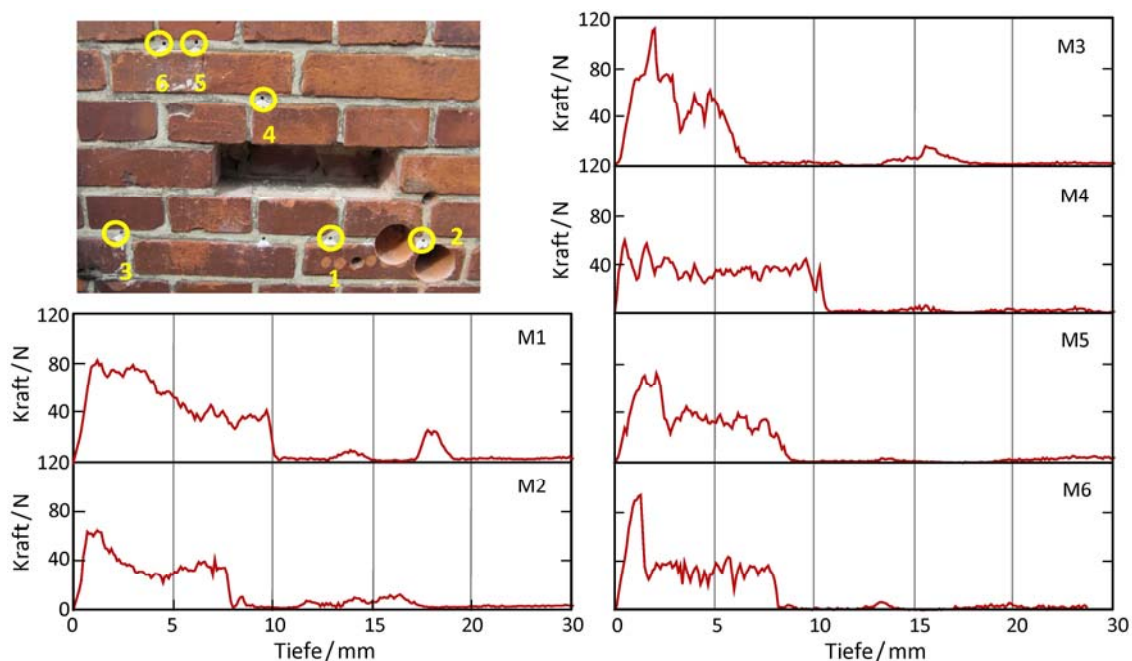


Abb. 66: Bohrwiderstandsmessungen auf der Ostseite. Positionen der Bohrwiderstandsmessungen in den originalen Fugenmörteln der Lagerfugen (Foto) und Messprofile der Messungen M1–M6.

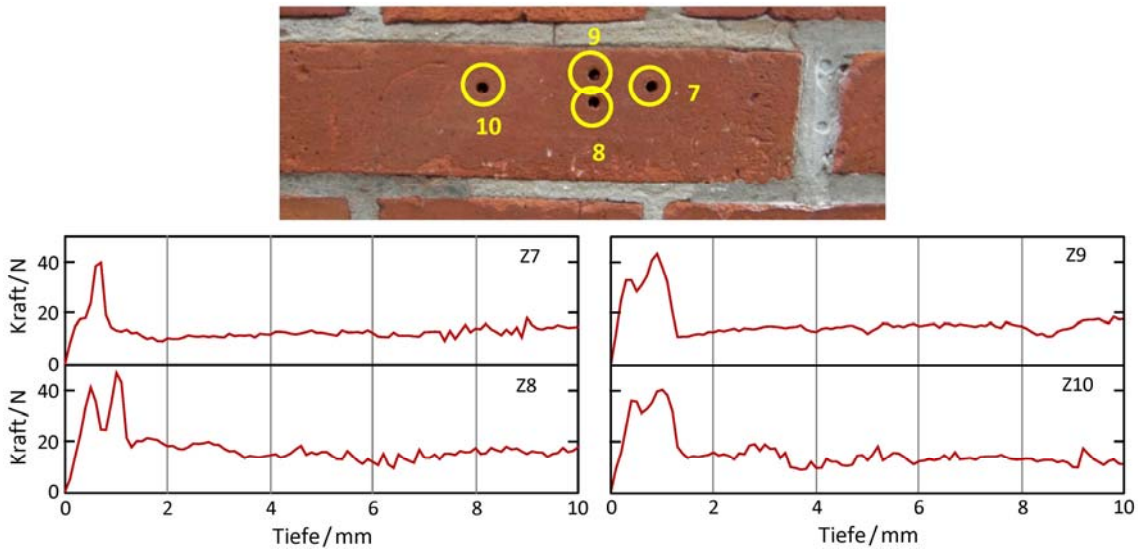


Abb. 67: Bohrwiderstandsmessungen an einem augenscheinlich intakten Ziegel mit Brennhaut (Westseite). Positionen der Bohrwiderstandsmessungen (Foto) und Messprofile Z7–Z10.

Auf der Westseite wurden zunächst mehrere Bohrwiderstandsprofile an einem Ziegel mit nahezu vollständig erhaltener Brennhaut in sehr hoher Tiefenauflösung aufgenommen (Abb. 67). Dabei ließen sich im vordersten Millimeter zwei unterschiedlich ausgeprägte Festigkeitsmaxima feststellen, wobei das vordere Maximum der Dicke der insgesamt sehr dünnen Brennhaut entspricht und das zweite Maximum mit einer Verdichtung des Porengefüges durch Gips zusammenfällt, worauf die hochauflösten Tiefenprofile der Salzverteilung und die mikroskopischen Untersuchungen schließen lassen.

Weiterhin wurden auf der Westseite im Beprobungsbereich auch die rückgewitterte Oberfläche eines Ziegels untersucht und der ursprüngliche Fugenmörtel mit einem alten großflächig eingesetzten Austauschmörtel miteinander verglichen (Abb. 68). Im vorderen Bereich der rückgewitterten Ziegeloberfläche liegt, wie zu erwarten, eine Verringerung der Festigkeit durch die sukzessive fortschreitende Schuppenbildung vor. In 1.5 bis 2 mm Tiefe erfolgte bereits ein deutlicher Festigkeitsanstieg, der teilweise über der Festigkeit der Ziegelrandzone liegt (Messungen Z22 und Z23). Dieses wird ebenfalls auf die Vergipsung des Porenraumes zurückgeführt. Der alte Austauschmörtel (Messung M24) besitzt eine deutliche niedrigere Festigkeit als der ursprüngliche Fugenmörtel (Messung M25 und M26), wobei selbst das Maximum in Oberflächennähe nicht an die Festigkeit des Originalfugenmörtels heranreicht. Bei allen Fugenmörteln ist die hintere Grenze anhand des Festigkeitsabfalls ohne weiteres erkennbar und liegt für Messung M24 bei ca. 7 mm, bei Messung M25 bei ca. 8 mm und bei Messung M26 bei ca. 6 mm. Der Mauermörtel ist in seiner Festigkeit stark geschwächt und weist nur noch punktuell einen Kornzusammenhalt durch das Bindemittel anhand der Festigkeitswerte auf.

Im Bereich des Bauabschnitts 1 wurde, nachdem die erste Neuverfugung aufgrund starken Absandens infolge mangelnder Nachbehandlung entfernt und nochmals verfugt worden ist, ein Bohrkern zur Kontrolle des Neuaufbaus, bestehend aus dem Restauriermörtel (Fugenmörtel) und dem Salzspeichermörtel dahinter, entnommen. Abb. 69 zeigt

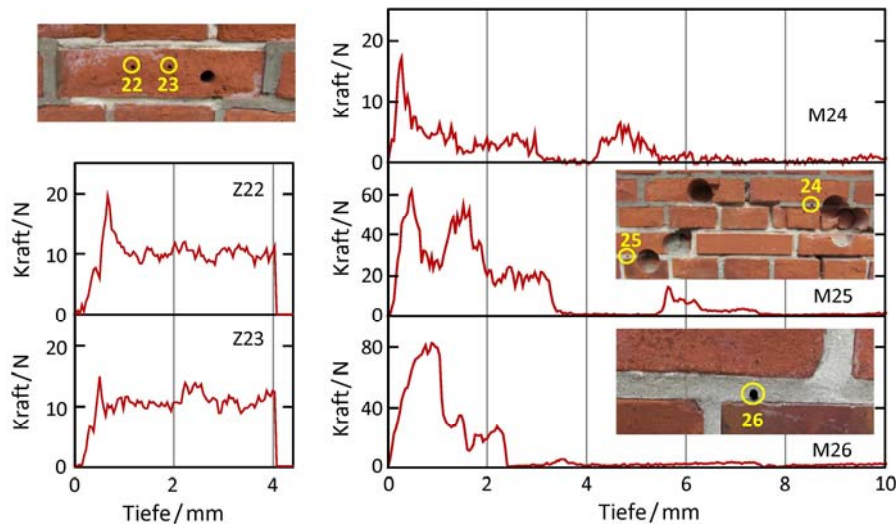


Abb. 68: Bohrwidstandsmessungen verschiedener Materialien und Oberflächenzustände auf der Westseite des Westflügels. Messpunkte Z22 und Z23 an zurückgewittertem Ziegel (Foto, Profile links), Messpunkte M24 und M25 im alten Austauschmörtel und im originalen Fugenmörtel (Foto rechts oben, oberes und mittleres Profil rechts), Messpunkt M26 im originalen Fugenmörtel (Foto und Profil rechts unten).

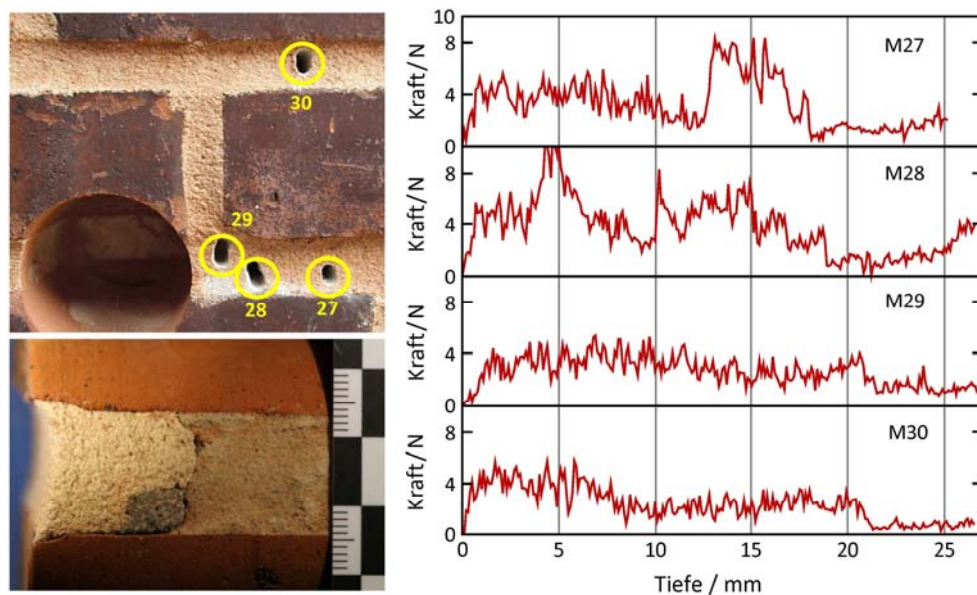


Abb. 69: Bohrwidstandsmessungen im Bauabschnitt 1 auf der Westseite des Ostflügels. Position der Bohrkernentnahme und Borhärtemesspunkte (oberes Foto), Detailaufnahme des Bohrkerns mit Mörtelaufbau (unteres Foto) sowie Messprofile M27–M30.

sowohl die Entnahmestelle (oberes Foto) als auch eine Detailaufnahme des Bohrkerns (unteres Foto). Die gereinigte Bohrkernaußenseite befindet sich links. Gut zu erkennen ist dort der Restauriermörtel mit leicht gelblichem Farbton. Der Salzspeichermörtel (grau) liegt nur in geringer Dicke vor und erstreckt sich nicht einmal über den halben Fugenquerschnitt, ist also nicht fachgerecht ausgeführt. Dahinter befindet sich der hellbraune originale Fugenmörtel.

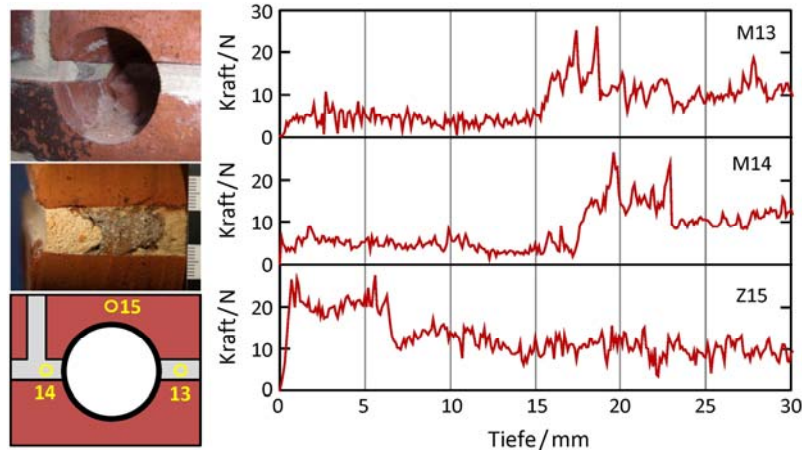


Abb. 70: Bohrwidstandsmessungen in Musterfläche 1. Bohrloch mit an der Bohrlochflanke sichtbaren Restaurier-, Salzspeicher- und Mauermörteln (Foto oben), gereinigte Bohrkernaußenseite (Foto Mitte), schematische Darstellung der Position der Bohrwiderstandsmessungen (links unten) und Messprofile M13, M14 und Z15.

In der Lagerfuge wurden rechts des Bohrkerns drei Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt. Die Messpositionen und Festigkeitsprofile sind ebenfalls in Abb. 69 dokumentiert. Zusätzlich wurde auch eine Messung in der Lagerfuge darüber vorgenommen. Im Profil M27 kann der Salzspeichermörtel eindeutig detektiert werden, dagegen ist Bohrung M28 in dieser Hinsicht nicht eindeutig interpretierbar. Bohrung M29 befindet sich im Fugenquerschnitt über dem Salzspeichermörtel. In der Lagerfuge darüber konnte ebenfalls kein Salzspeichermörtel festgestellt werden (M30). Hier bestätigt sich, dass sich die Bohrwiderstandsmessung ausgezeichnet zur Erfolgskontrolle der Maßnahme am Objekt einsetzen lässt.

Die Musterfläche 1, aus der ebenfalls ein Bohrkern für die Dünnschliffherstellung entnommen wurde, wurde erst nach der Neuverfugung des Bauabschnitts 1 durch Anwendungstechniker des Produktherstellers angelegt. Fotos der Entnahmestelle des Bohrkerns sowie des gereinigten Bohrkerns sind in Abb. 70 zu sehen. In beiden Bildern ist deutlich die Abfolge der drei Mörtel zu erkennen. Der Salzspeichermörtel als Hinterfüllung des Fugenmörtels erstreckt sich als Tiefenverfugung über den gesamten Fugenquerschnitt. Bohrwiderstandsmessungen wurden jeweils in der Lagerfuge rechts und links des Bohrloches und zum Vergleich der Festigkeiten im Ziegel oberhalb des Bohrloches durchgeführt (Abb. 70, links unten). Die Festigkeitsprofile M13 und M14 lassen eindeutig den Übergang von Fugen- zu Salzspeichermörtel erkennen, deren Tiefe zwischen 15–20 mm leicht variiert. Die Bohrung im Ziegel erfolgte in einer rückgewitterten Oberfläche ohne Brennhaut (Z15). Dennoch besitzt der Ziegel in der Oberflächenzone bis in ca. 7 mm Tiefe eine höhere Festigkeit als in größerer Tiefe.

Im Profil Z15 (Abb. 70) werden allerdings nicht so hohe Festigkeiten wie in den Ziegeln mit Schalenbildung aus der gleichen Musterfläche erreicht. Diese sind in Abb. 71 dargestellt. Es wurde versucht, durch versetzte Bohrungen die laterale Ausdehnung einer Schale abzuschätzen (Abb. 71, links). Während die Entfestigung im Bereich der Schale anhand des Festigkeitsprofils Z16 eindeutig nachzuweisen ist, liegt in dem weni-

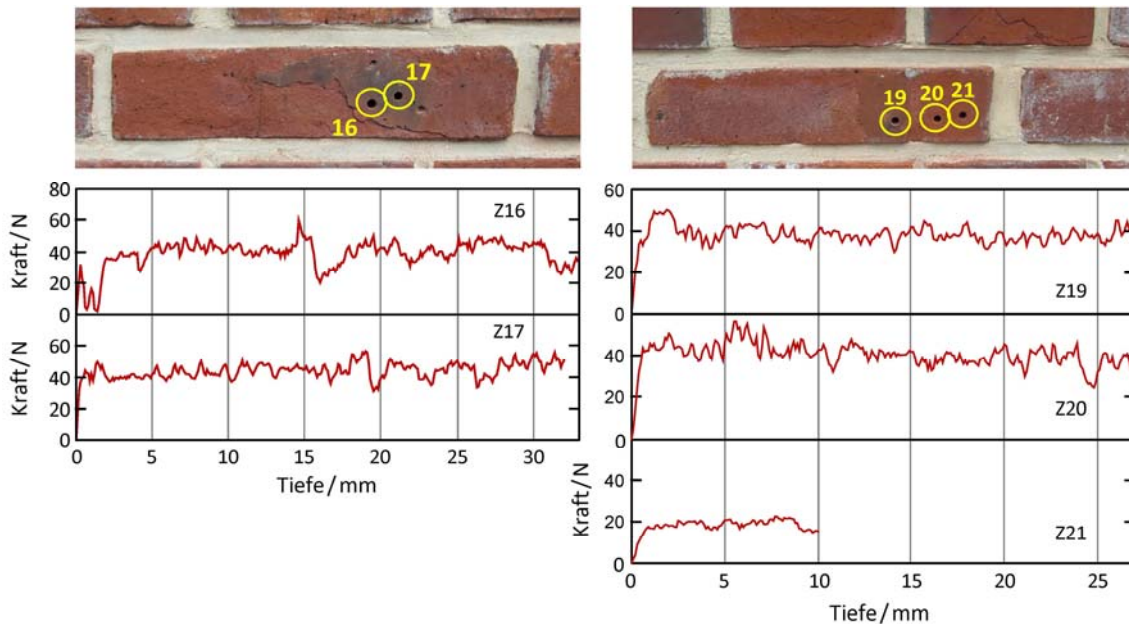


Abb. 71: Bohrwiderstandsmessungen an Ziegeln mit Schalenbildung im Bereich der Musterfläche 1. Links: Messprofile Z16 und Z17 in unterschiedlicher Entfernung vom Schalenrand; rechts: Messprofile Z19 (Schale), Z20 (ablösende Schale bzw. Brennhaut) und Z21 (Randbereich).

ge Zentimeter davon entfernt bestimmten Profil Z17 offensichtlich noch keine schalenartige Ablösung der Brennhaut vor. Die Schalenbildung entwickelt sich also sukzessive und kleinräumig. Am zweiten Ziegel (Abb. 71, rechts) liegt nur noch eine kleine Fläche mit Brennhaut vor. In diesem Bereich wurde Bohrung Z19 ausgeführt. Das Festigkeitsprofil lässt noch keine Ablösung erkennen. Die Bohrung Z20 erfolgte in einem Bereich in dem sich die Schale bzw. Brennhaut bereits abgelöst hatte. Das Profil zeigt nach Ablösung der Brennhaut bereits unmittelbar an der sekundären Oberfläche einen stabilen Zustand ohne Auflockerungen an. Die starke Abnahme des Bohrwiderstands, d.h. die geringere Festigkeit, die in Messprofil Z21 zu erkennen ist, kann wohl dem Randeinfluss infolge des durch das Strangpressverfahren erzeugten anderen Gefüges zugeschrieben werden. Zusätzlich zu den Festigkeitsprofilen in der Oberflächenzone des Ziegelmauerwerks erfolgten auch Bohrhärtewiderstandsmessungen im Innenbereich und zwar auf der Innenseite der Nordwand des Ostflügels. Dort weist das Mauerwerk die gleichen Merkmale auf wie das Mauerwerk in den Wendeltreppenaufgängen, d.h. den Zugängen zu den beiden Dachböden und ist für die Messungen leichter zugänglich. Wie in den beiden Treppenhäusern trug die Giebelwand ursprünglich einen Kalkputz, der nur noch in Teilbereichen vorhanden ist. Die Abb. 72 (links) zeigt diesen Putz in zwei unterschiedlichen Erhaltungszuständen. Der augenscheinlich an der Oberfläche aufgelockerte Putz steigt in seiner Festigkeit nach innen sehr schnell an, wobei der Festigkeitssprung bereits die Ziegeloberflächenzone markiert (P31). Demgegenüber wirkt der andere Putz an der Oberfläche völlig fest und wird möglicherweise durch Gips im Porenraum zusätzlich verdichtet und stabilisiert. Offensichtlich aber ist der Putz unterhalb dieser Zone völlig entfestigt, wie das Festigkeitsprofil P32 bestätigt. Auch in einem Ziegel der nach dem Verlust der Putzoberfläche völlig intakt erscheint, kann die Varia-

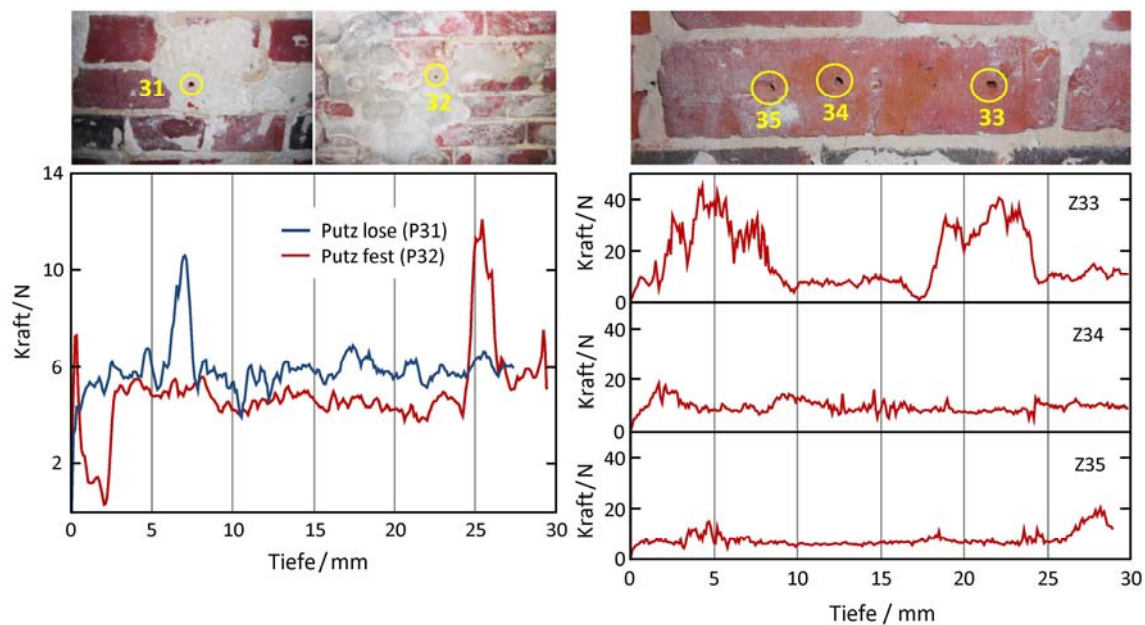


Abb. 72: Bohrwiderstandsmessungen im Innenbereich (Nordgiebel des Ostflügels). Links: Messprofile P31 (Putz lose) und P32 (Putz fest anhaftend); rechts: Messprofile Z33–Z35.

tionsbreite hinsichtlich seiner tiefenabhängigen Festigkeit sehr groß sein (Abb. 72, links).

4.2.8 Polarisationsmikroskopische Untersuchungen am Mörtel–Ziegel-Verbund

Anhand sogenannter Sandwichproben lassen sich in Ergänzung zu den Salzuntersuchungen durch gezielte lichtmikroskopische Analysen, die Mineralphasen- und Gefügeveränderungen von der unmittelbaren Oberflächenzone bis in den Mauermörtel hinein erfassen, auch wesentliche Aussagen zur Anreicherung von Gips und indirekt löslichen Salzen im Bereich der Fugen sowie zum Wassertransportverhalten treffen. Für diese Untersuchungen wurde die bereits in Kap. 4.2.4 erwähnten, für die Salzanalytik herangezogenen Bohrkern verwendet (vgl. Abb. 29a und b, S. 47).

Zunächst wurde der Zustand der makroskopisch intakt erscheinenden Fugen und des ebenso intakten Mauerwerksverbundes auf großen Teilen der Ostseite des östlichen Gebäudeflügels als Beispiel für den am besten erhaltenen Ausgangszustand mikroskopisch erfasst. Die Übersichtsaufnahme Abb. 73a vermittelt einen Eindruck von der Lagerfuge, deren untere Kante mit dem Fugeisen leicht abgeschrägt wurde, damit an der Fassade ablaufendes Regenwasser unproblematisch abgeführt werden kann. Bereits in dieser Darstellung wird deutlich, dass die Fugen lediglich im unmittelbaren vorderen Bereich einen engen Kontakt zum Ziegel aufweisen, und sich ansonsten das Porengefüge an der Grenzfläche zu den beiden Ziegeln und zum Mauermörtel deutlich von den fugenmörtelinternen Poren unterscheidet. Diese nahezu umlaufenden Poren besitzen eine Größe von ca. 50–300 μm , in welchem ablaufendes Regenwasser bzw. Schlagregen zum einen noch durch kapillares Saugen aufgenommen und zum anderen bereits stark durch Winddruck in das Mauerwerk hineingedrückt werden kann [62], wobei auf

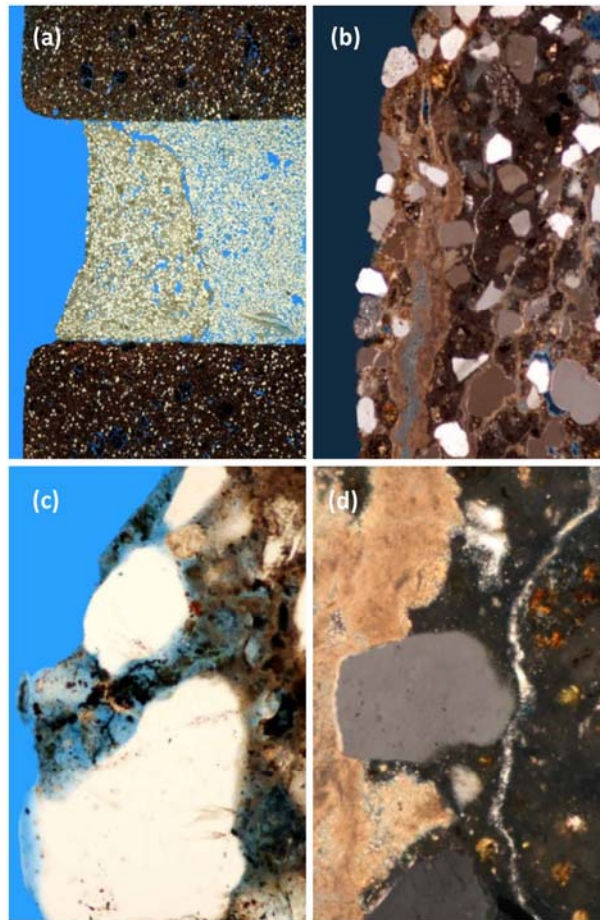


Abb. 73: Dünnschliff von Sandwichbohrkern BK8 senkrecht zur Oberfläche (Ostseite des östlichen Gebäudeteils aus augenscheinlich intakten Bereich). (a) Übersichtsaufnahme mit zur linken Bildseite orientierter Außenseite, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 27 mm; (b) Ausschnitt aus der unteren Hälfte der Fugenmörteloberfläche, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (c) Bindemittelauflösung in der unmittelbaren Oberflächenzone des Fugenmörtels unter Beteiligung von Mikroorganismen, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 0.5 mm, (d) Carbonatisierungsfront (links) im Fugenmörtel und Rissfüllung durch Gips, gekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm.

der von den Hauptwindrichtungen abgewandten Ostseite dieser Einfluss sicherlich geringer ist als auf den anderen Gebäudeseiten.

Dennoch liegt bereits eine Umwandlung des ursprünglichen Fugenmörtels in der Oberflächenzone vor, wie der Ausschnittsvergrößerung gleicher Orientierung wie die Übersichtsaufnahme entnommen werden kann (Abb. 73b). Während die mittlere Zone im Bild noch die typischen dunklen Farben des unveränderten stark zementhaltigen Bindemittels zeigt, ist die vordere Zone vollständig carbonatisiert, desgleichen eine Zone hinter dem unverändertem Primärgefüge, in der feine Risse oder Lösungsbahnen durch Calcit verheilt sind. Der Stofftransport (Calcium) ist teilweise von der Oberfläche erfolgt, zumal dort ein Bindemittelabbau unter Beteiligung von Mikroorganismen mikroskopisch nachweisbar ist, wie der Abb. 73c zu entnehmen ist. Ein sehr feiner Riss in der ansonsten unveränderten Fugenmörtelzone besitzt eine Füllung mit Gips und nicht mit Calcit (Abb. 73d).

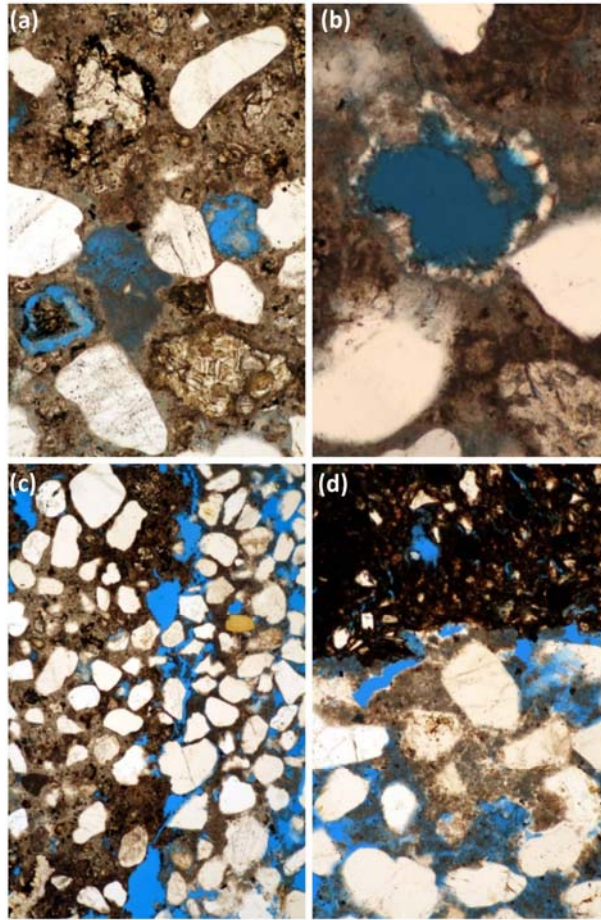


Abb. 74: Weitere Veränderungen im Fugen- und Mauermörtel von BK8. (a) Bindemittelrelikte und Mineralneubildungen in den Poren des Fugenmörtels, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (b) nadelige Mineralneubildungen als Saum entlang einer Grobpore im Fugenmörtel, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (c) Rissbildung zwischen Fugenmörtel und Mauermörtel, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (d) Imprägnierung des kalkigen Bindemittels des Mauermörtels mit Gips am Rand zum Ziegel, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm.

Auch etwas tiefer im Fugenmörtel, in welchem das Bindemittel zunächst dem Ausgangszustand zu entsprechen scheint, liegen punktuell bereits Veränderungen vor. Bei den Poren in der Mitte handelt es sich um Lösungsporen in die teilweise neue Minerale hineingewachsen sind oder sich noch Relikte der ursprünglichen befinden (Abb. 74a). Darüber hinaus sind in diesem Ausschnitt viele Restklinkerkörner des zementären Bindemittelanteils sichtbar. Die in die Poren vom Rand aus hineingewachsenen Kristalle besitzen eine primär nadelige Morphologie, und wachsen zu optisch einheitlich orientierten „Kristallenbündeln“ weiter, deren optische Eigenschaften auf Ettringit hinweisen (Abb. 74b).

Veränderungen lassen sich auch an der Grenzfläche zum Mauermörtel und in diesem selbst feststellen. Durch die Gefüge- und Mineralumwandlungen im Fugenmörtel ist es infolge eines Spannungsaufbaus in einem Teilstück entlang der Grenzfläche zur Rissbildung gekommen (Abb. 74c). Auch im Mauermörtel liegt im Kontakt zum Ziegel stellenweise eine Imprägnierung des calcitischen Bindemittels mit Gips vor, der durch den

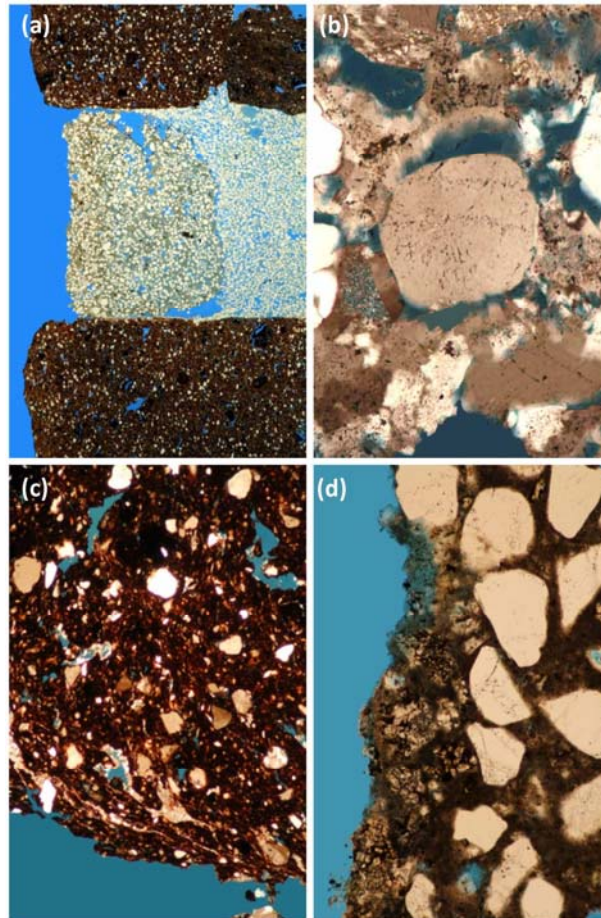


Abb. 75: Dünnschliff von BK1, der einen augenscheinlich noch guten Erhaltungszustand auf der Westseite repräsentiert. (a) Übersichtsaufnahme mit nach links weisender Außenseite, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 26 mm; (b) Veränderung des Mauermörtelgefüges durch Gipswachstum um ein Quarzkorn, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (c) Gipseinlagerung in den Ziegel an vorderen Kontakt zum Fugenmörtel, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (d) Oberflächenzone des Fugenmörtels mit vielen Restklinkerkörnern, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm.

besseren Wassertransport entlang der Fugengrenze bis in den Mauermörtel hineingelangen konnte (Abb. 74d). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der augenscheinlich intakte Fugenmörtel sowie dessen Verbund zum Mauermörtel und Ziegel sich im mikroskopisch sichtbaren Bereich verändert hat und nicht mehr vollständig den Primärzustand repräsentiert.

Auf der Westseite des westlichen Gebäudetraktes existieren kaum noch Originalfugenmörtel, welche den scharfen Abdruck des Fugeisens an der Oberfläche nachzeichnen, sondern bestenfalls nur eine leichte Aufrauung der Fugenoberfläche besitzen. Ein solches Beispiel bildet BK1, dessen Übersicht Abb. 75a wiedergibt. An der oberen Kante der Lagerfuge liegt zwar noch kein Fugenflankenabriss vor, dennoch konnten hier viel Wasser und Aerosolpartikel über große Poren aufgenommen werden. In dem daran angrenzenden Zwickel des Mauermörtels sind Gipskristalle gewachsen, die das ursprüngliche Bindemittel nicht nur verdrängt haben, sondern über dieses hinaus den Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlag veränderten, wie sich anhand der Verunreinigun-

gen, d.h. der Relikte des ursprünglichen kalkigen Bindemittels in der sekundären Gipsmatrix nachvollziehen lässt (Abb. 75b). Bei genauer Betrachtung des Ziegels an der Vorderkante zum Fugenmörtel fällt auf, dass Gips nicht nur dessen große Poren auskleidet, sondern auch Risse ausfüllt (Abb. 75c). Die Oberfläche des Fugenmörtels lässt nur einen geringen Bindemittelabbau erkennen, was aus dem schnelleren Materialabtrag durch die stärkere Beanspruchung auf der Westseite resultiert. Bei dieser Probe ist der Fugenmörtel bereits vollständig carbonatisiert (Abb. 75d).

Anhand der Dünnschliffe von 3 Sandwichbohrkernen, die sämtlich von der Südseite des östlichen Gebäudetraktes oberhalb des Verbindungsbaus zwischen den Schulhöfen stammen, lässt sich die Abhängigkeit der Position der Gipskristallisation im Gefüge von der Verteilung der Makroporen, d.h. der lichtmikroskopisch sichtbaren Poren, nachvollziehen, wobei dies auch stets mit den bevorzugten Bahnen des Wassertransportes verbunden ist.

Die Übersichtsaufnahme von BK15 in Abb. 76a stellt den Schnitt durch eine Blasenbildung im Fugenmörtel dar, die makroskopisch bereits in Abb. 20c (S. 35) als Ansicht wiedergegeben ist. Die Gefügeveränderungen durch Gipskristallisation befinden sich sämtlich im vorderen Bereich der Fuge und der angrenzenden Ziegel. Die Flankenhaftung des Fugenmörtels an dem Ziegel ist in der unmittelbaren Oberflächenzone sehr gut, so dass weder ausgeprägte Blattkapillaren noch größere Poren vorhanden sind, die bei Regen ein Durchströmen infolge starken Winddrucks zulassen. Die Trocknungs- und damit Kristallisationszone reicht im Fugenmörtel von der Oberfläche bis in ca. 1.5 mm Tiefe, während sie im angrenzenden unteren Ziegel unter der Brennhaut beginnt und ebenfalls bis in diese Tiefe reicht. Bei dem oberen Ziegel setzt die durch Gips veränderte Oberflächenzone unmittelbar unter der Ziegeloberfläche ein.

Durch die Gipseinlagerungen hat sich die Oberflächenzone des Fugenmörtels vom Untergrund gelöst, so dass ein Hohlraum entstehen konnte. Anhand der Ausschnittsvergrößerung (Abb. 76b) dieser Zone lassen sich die Veränderungen sehr gut nachvollziehen. Das ursprüngliche Bindemittel aus Portlandit und Zement, in welchen die weißen (transparenten) Quarzzuschlagkörner eingebettet sind, besitzt im Durchlicht einen braunen Farbton, während der Gips in weißem Farbton (transparent) das Mörtelgefüge als Rissfüllungen parallel zur Oberfläche durchzieht. Der Gips bildet quasi ein sekundäres Gefüge aus, dessen interner Zusammenhalt wesentlich schwächer ist als der des ursprünglichen Bindemittels.

In dem Detail einer Flanke der aufgerissenen Blase (unterer Rand des Fugenmörtels in der Übersichtsaufnahme) sind die Quarzkörner bei teilgekreuzten Polarisatoren sehr gut von den Gipskristallen zu unterscheiden (Abb. 76c). Dabei fällt auf, dass einige Zuschlagkörner infolge der Beanspruchung zerbrochen sind. Das betrifft auch die noch nicht aus dem Verbund gelöste untere Flanke der Blase in Abb. 76d (ebenfalls teilgekreuzte Polarisatoren). Die Gipskristalle sind häufig in Richtung Zuschlagkorn gewachsen. Liegt ein Spalt bzw. eine umlaufende Pore um das Quarzkorn vor, kann der Gips ungehindert in diesen Hohlraum hineinwachsen, so dass die Kristalle glatte Flächen aufweisen. Wird das Wachstum behindert, weil der Raum ausgefüllt ist und die Kristalle eng aneinander liegen, entstehen suturierte Kristallgrenzen.

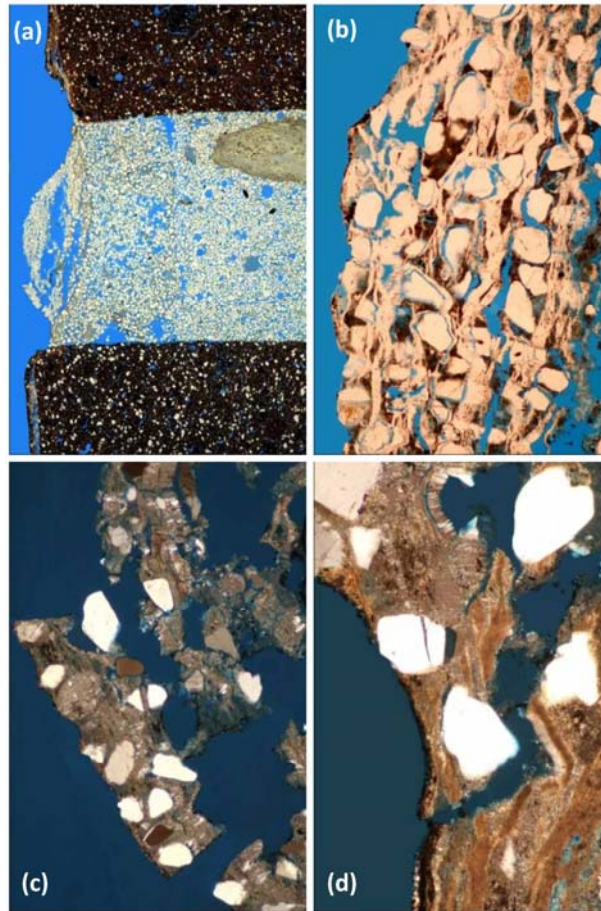


Abb. 76: Blasenbildung durch Gips im Fugenmörtel von BK15 (Südseite des Osttraktes). (a) Übersichtsaufnahme, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 26 mm; (b) Völlige Auflösung des Primärgefüges und labile sekundäre Stabilisierung durch Gips, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (c) Herauslösung einzelner Schuppen am Rand der Blase, sowie Quarzkornzerstörung, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (d) Verschiedene Morphologien der Gipskristalle an der Flanke des Blase, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm.

Wenn der Fugenmörtel keine ausreichende Verbindung zu den Fugenflanken oder zum Mauermörtel hat und bereits geschädigt ist, wie im Beispiel von BK13 in Abb. 77a, erfolgt die Gipskristallisation als eng begrenzte Zone im Mauermörtel. Den augenscheinlichen Schädigungsgrad des Fugenmörtels gibt Abb. 20a (S. 35) wieder, in welcher die Probe in der linken oberen Bildecke entnommen wurde, wobei das Foto den Zustand vor der Probenahme zeigt. Aufgrund der geringeren Dicke des Fugenmörtels als in den anderen Proben ist anzunehmen, dass die Oberflächenzone anfänglich vergipst war, worauf auch die oberflächennahe Gipsschädigung im unteren Ziegel hinweist (Abb. 77b), und sich mit zunehmender Rückwitterung neue Wege für den Wassereintrag öffneten. Die Kristallisationszone ist praktisch nach innen gewandert. Im vorderen Bereich des Mauermörtels herrscht noch Materialauflösung vor, während in weniger als 1.5 mm Tiefe eine Imprägnierung des Mauermörtelgefüges mit Gips feststellbar ist Abb. 77c. Die Gefügeveränderung verlief nicht gleichmäßig. An der oberen Fugenflanke existierte ein besserer Kontakt zwischen Mörtel und Ziegel als an der unteren

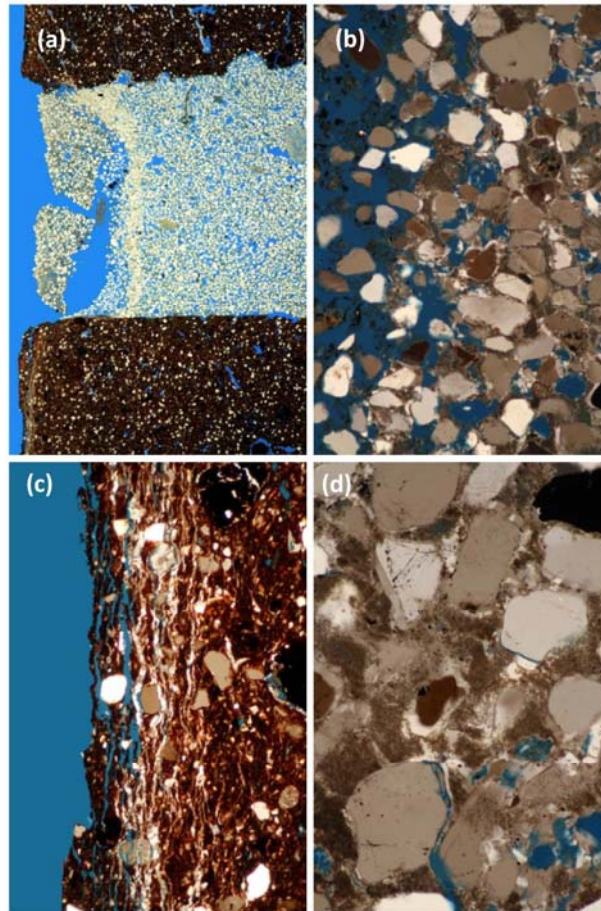


Abb. 77: Geschädigter Fugenmörtel und Gipskristallisation im Mauermörtel am Beispiel von BK13 (Südseite des östlichen Gebäudeteils). (a) Übersichtsaufnahme, lange Bildkante: 25 mm, parallele Polarisatoren; (b) oberflächennahe Ziegelzerstörung durch Gips, lange Bildkante: 2.5 mm, teilgekreuzte Polarisatoren; (c) Gipseinlagerung in den Mauermörtel (linke Bildhälfte), lange Bildkante: 2.5 mm, teilgekreuzte Polarisatoren; (d) stärkere Verdichtung und Umbau des Primärgefüges am oberen Rand des Mauermörtels, lange Bildkante: 1 mm, teilgekreuzte Polarisatoren.

ren, so dass es zum Spannungsaufbau und infolgedessen zur Rissbildung kam. In die vorwiegend diagonal verlaufenden Risse ist der Gips kristallisiert (Abb. 77d).

Bohrkern 10 in Abb. 78a vereint die verschiedenen beschriebenen Merkmale getrennt für die obere und untere Fugenflanke, wobei an letztgenannter zwischen Fugenmörtel und Ziegel ein durchgängiger Kontakt besteht. Deshalb hat sich der Gips im vorderen Bereich des Mörtels und Ziegels gebildet. Während oben vermutlich von Anfang an Blattkapillaren und/oder größere Poren an der Grenzfläche vorlagen, so dass gipsgesättigtes Wasser bis in den Mauermörtel eindringen konnte. Der ungleiche Spannungsaufbau hat sich verstärkt, so dass sogar der obere Ziegel vom Fugenmörtel ausgehend einen diagonalen Riss aufweist, der allerdings makroskopisch noch nicht erkennbar war. Während sich in der oberen Hälfte der Fuge durch Verwitterungseinflüsse das Bindemittel vorn gelöst hat und Zuschlagkörner aus dem Verbund herausfielen (Absanden), wurde das Fugenmörtelgefüge durch Gips völlig verändert und sekundär stabilisiert. Dabei handelt es sich jedoch nur um eine scheinbare Stabilisierung.

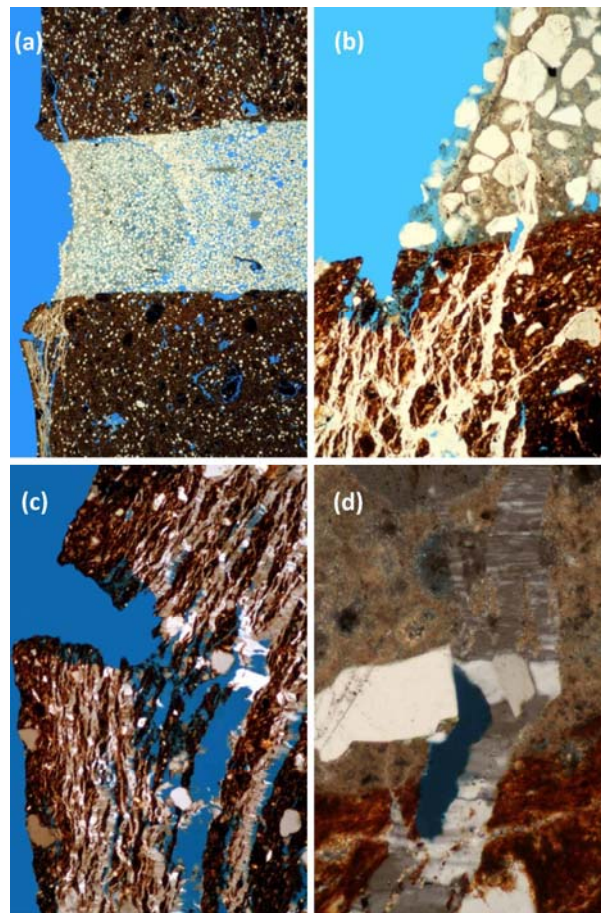


Abb. 78: Unterschiedliche Position der Gipseinlagerung innerhalb einer Fuge am Beispiel von BK10 (Südseite des östlichen Gebäudeteils). (a) Übersichtsaufnahme, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 25 mm; (b) Gipseinlagerung im unteren Ziegel mit Rissbildung senkrecht zur Oberfläche, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (c) Übergang vom unteren Ziegel zur unteren Fugenmörtelkante, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (d) Detail aus c, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm.

In dem stark veränderten Gefüge des unteren Ziegels ist mit zunehmender Vergipsung ein Riss entstanden, durch den Wasser in das Gefüge eindringen konnte und den angrenzenden Gips gelöst und damit verlagert hat (Abb. 78b). Die Gefügeveränderung des Ziegels durch Gips ist am Fugenrand am stärksten. Aufgrund der vollflächigen Haftung des Fugenmörtels am Ziegel haben sich Spannungen im Ziegel direkt in den Fugenmörtel hinein fortgesetzt. Die Risse sind heute materialübergreifend mit Gips gefüllt, wie sich anhand von Abb. 78c mit parallelen Polarisatoren nachvollziehen lässt. Die Ausschnittsvergrößerung in Abb. 78d mit teilgekreuzten Polarisatoren zeigt die Gipsfüllung am Übergang vom Ziegel zum Mörtel. Lag ausreichend Platz vor, wuchs der Gips mit klaren Kristallgrenzen in Form von relativ großen Kristallen in die Hohlräume hinein. Waren die Risse weitgehend gefüllt, kam es an den Grenzflächen zur Kristallisation, Auflösung und Rekristallisation mit einer unregelmäßigen Kristallmorphologie und eine Ausrichtung der länglichen Kristalle senkrecht zur Oberfläche.

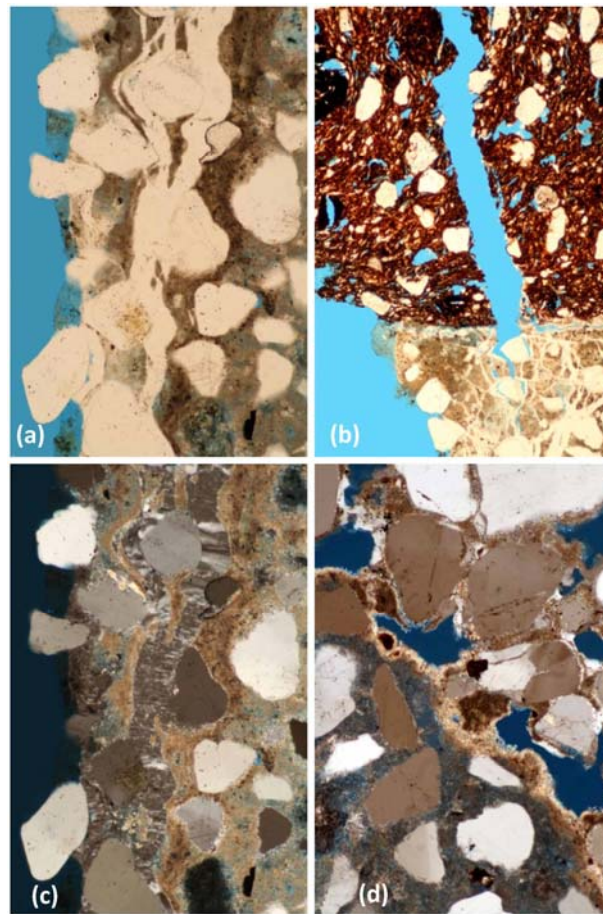


Abb. 79: Weitere Aufnahmen von BK10. (a) Bindemittelverlust an der Oberfläche und Gipseinlagerung in die Oberflächenzone des Fugenmörtels, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (b) gleicher Ausschnitt wie a, nur mit teilgekreuzten Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (c) oberer Fugenrand mit verzweigtem Rissnetz und Gipsfüllung im Fugenmörtel, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (d) Übergang zwischen Fugenmörtel (rechts) und gipsimprägniertem Mauermörtel (links), teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm.

Die untere Hälfte des Fugenmörtels charakterisiert eine Auflösung des primären Bindemittels an der Oberfläche, welches lediglich noch durch Reliktstrukturen erkennbar ist, und darunter eine Vielzahl von Rissen, die von Gips gefüllt sind, wie die beiden Aufnahmen in Abb. 79a und b mit parallelen und teilgekreuzten Polarisatoren bestätigen. Auch hier findet sich wieder die typische Gipsmorphologie, wenn kein Platz für freies Wachstum vorhanden ist.

In den Riss am oberen Rand des Ziegels konnte aufgrund der großen Breite kein gipsreiches Wasser kapillar aufgenommen werden, so dass praktisch keine Füllung durch Gips entstehen konnte, während der Fugenmörtel von gipsgefüllten Rissen stark durchsetzt ist (Abb. 79c). In der Summe ergeben die sehr viel dünneren gipsgefüllten Risse etwa die Öffnungsweite des Risses im Ziegel, wobei der Prozess der Rissöffnung noch nicht abgeschlossen ist. Durch das Eindringen von gipsreichem Wasser bis in den Mauermörtel, sind dort Salze in den Poren sichtbar, während ein Saum aus Calcitkristal-

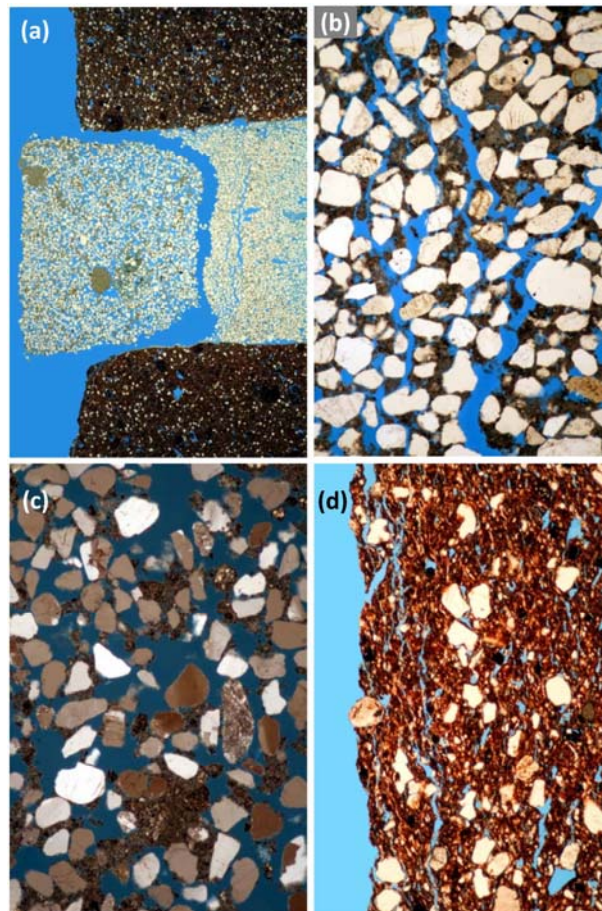


Abb. 80: Ausbesserungsmörtel (BK4, Westseite des westlichen Gebäudeteils). (a) Übersichtsaufnahme, die Ziegel sind gegenüber dem Fugenmörtel stark zurückgewittert; (b) Ausschnitt aus dem Fugenmörtel, teilgekreuzte Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (c) Rissbildung im Mauermörtel angrenzend zum Fugenmörtel, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm; (d) Starke Gefügelockerung in der Oberflächenzone des zurückgewitterten Ziegels, parallele Polarisatoren, lange Bildkante: 2.5 mm.

len die Grenzfläche des Fugenmörtels kennzeichnet (Abb. 79d). Der Fugenmörtel ist im hinteren Bereich nur wenig von Gips durchsetzt.

Während der Originalmörtel einen hohen Bindemittelanteil aufweist und die Gipseinlagerungen vorwiegend über den Wassertransport abhängig von den von vorn herein leicht variierenden Fugenflankenausbildungen gesteuert wird, besitzt der vorhandene Austauschmörtel eine große Porosität, die die Wasseraufnahme und damit auch den Salztransport erheblich begünstigt. Der Ziegel ist gekennzeichnet durch Materialverlust (Rückwitterung), während der Fugenmörtel gewissermaßen als „Fugenrahmen“ stehenbleibt, obwohl der Verbund zum Mauermörtel verloren gegangen ist. Dies spiegelt sich auch in der Übersichtsaufnahme Abb. 80a und der Detailaufnahme des Fugenmörtels in Abb. 80b (teilgekreuzte Polarisatoren) wider. Sowohl der Mauermörtel dahinter ist rissig (Abb. 80c) bis hin zu tiefgründig im Gefüge aufgelockert, so dass sich der Mörtel in bestimmten Mauerwerkspartien mit einem Fugeisen bis in 8 cm Tiefe herauskratzen

ließ. Die Oberflächenzone des rückgewitterten Ziegels weist ebenfalls starke oberflächenparallele Risse und Gefügelockerungen auf (Abb. 80d).

Aus Musterfläche 1 wurde ebenfalls ein Sandwichbohrkern entnommen, der in der Übersicht in Abb. 81a bei parallelen Polarisatoren dargestellt ist. Bei der Entnahme fiel der Bohrkern entlang der unteren Fugenflanke auseinander, da kein ausreichender Haftverbund ausgebildet war. Er wurde anschließend wieder zusammengefügt, weshalb der Riss entlang der Fugenflanke etwas breiter ist als er ursprünglich war. Die beiden Rissufer belegen allerdings aufgrund der nur unzulänglich übereinstimmenden Passform bereits die mangelhafte Flankenhaftung vor der Entnahme. Die Detailaufnahme in der Abb. 81b dokumentiert den hinteren Bereich des Salzspeichermörtels angrenzend an den Bestandsmauermörtel, zu dem selbst im durch die Probenahme ungestörten Bereich kein Kontakt besteht. Neben Leichtfüllstoffen aus Blähglasgranulat enthält der Salzspeichermörtel einen weiteren Leichtzuschlag (Abb. 81c) und Bündel aus Kunststofffasern zur Gefügeverstärkung, die in der Aufnahme senkrecht zu ihrer Längserstreckung angeschnitten sind. Auch zwischen dem Restauriermörtel, der ebenfalls Leichtzuschlagkörner aufweist, und dem Salzspeichermörtel bestehen bestenfalls nur punktuelle Kontakte (Abb. 81d), so dass der vom Salzspeichermörtel erwartete Effekt bezüglich der Aufnahme von Salzen aus dem angrenzenden Ziegel und Mörtel, über seine feinen Kapillarporen, die mittels Lichtmikroskopie nicht erkennbar sind, und deren Einlagerung in die großen Poren nicht auftritt.

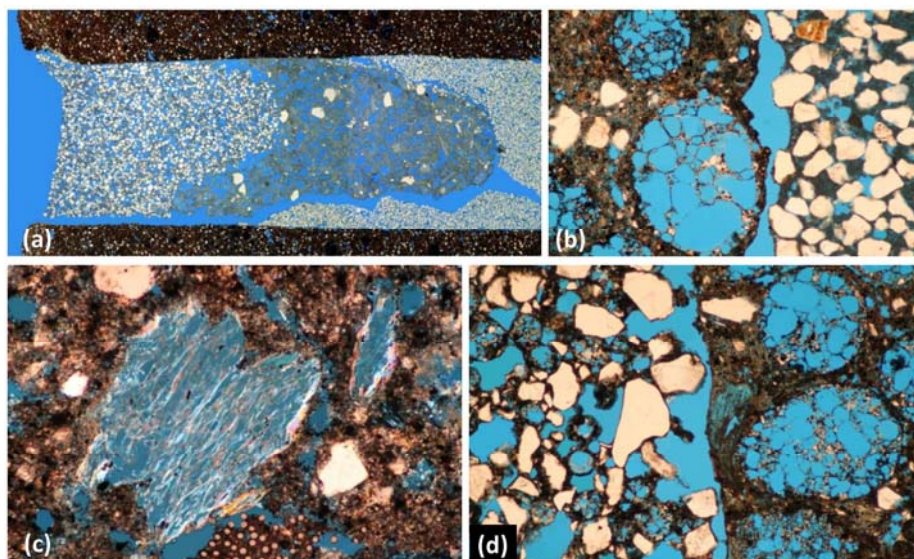


Abb. 81: Petrografischer Dünnschliff eines Sandwichbohrkerns (BA1-BK1) aus Musterfläche 1. (a) Dünnschliffübersicht mit nach links weisender Außenseite, von außen nach innen: Restauriermörtel, Salzspeichermörtel, originaler Mauermörtel, lange Bildkante: 40 mm, parallele Polarisatoren; (b) Kontakt zwischen Salzspeichermörtel (links) und originalem Mauermörtel (rechts), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (c) weiterer Leichtfüllstoff und Kunststofffasern quergeschnitten (untere Bildhälfte), lange Bildkante: 2.5 mm, teilgekreuzte Polarisatoren; (d) Kontaktzone zwischen Restauriermörtel mit dem verputzt wurde (links) und Salzspeichermörtel (rechts), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren.

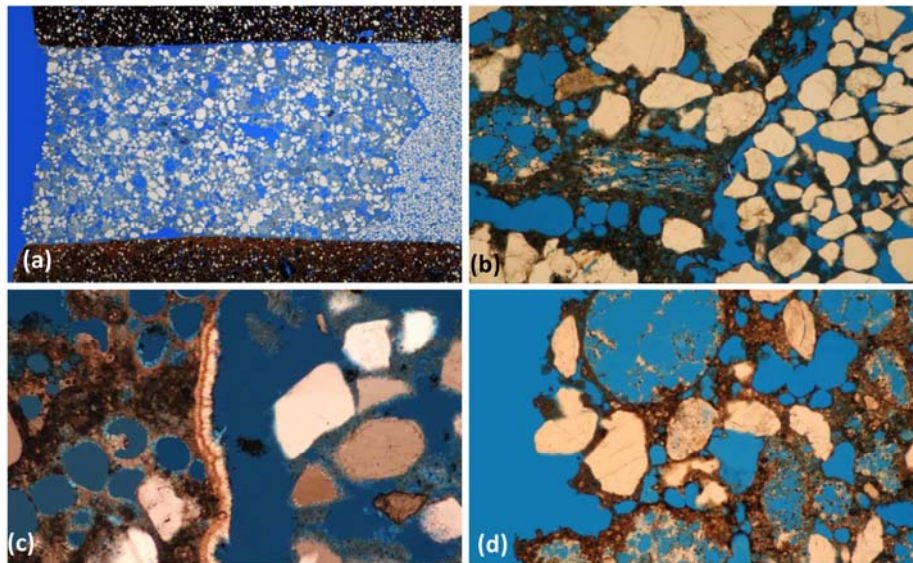


Abb. 82: Petrografischer Dünnschliff eines Sandwichbohrkerns (Musterfläche 2). (a) Übersicht, Außenseite links, lange Bildkante: 30 mm, parallele Polarisatoren; (b) Übergang Salzspeichermörtel und alter Mauermörtel (rechts der Mitte), Leichtfüllstoff Bims (Bildmitte), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (c) Calcitsaum auf Teilstück der Rückseite des Salzspeichermörtels, lange Bildkante: 2.5 mm, teilgekreuzte Polarisatoren; (d) Vorderseite des Salzspeichermörtels, lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren.

Eine polarisationsmikroskopische Übersichtsaufnahme eines Bohrkerns aus Musterfläche 2 ist in Abb. 82a dargestellt. Für den vorderen Bereich zeigt die Übersichtsaufnahme, dass durch den starken Anpressdruck ein ausreichender Kontakt zu beiden Ziegelflanken vorliegt. Nach wenigen Millimetern treten aber längliche Blattkapillaren bis hin zu durchströmbaren Poren auf. Zum Mauermörtel besteht eine bessere Verbindung als in Musterfläche 1 (Abb. 82b), es liegt aber noch keine Verzahnung vor, in der ein gleichmäßiger Weitertransport des Wassers über Kapillarporen möglich erscheint. Auf einen hohen Wassereintrag weist die nach kurzer Zeit bereits starke Carbonatisierung in Form eines Saumes aus großen Calcitkristallen auf Teilen der Rückseite des Salzspeichermörtels hin (Abb. 82c). Die Außenseite ist geprägt durch die hohe Porosität der Leichtfüllstoffe und der Grobporen durch Luftporenbildner (Abb. 82d).

Es wurde bereits in Kap 4.2.6 auf Basis von Wasseraufnahmemessungen vermutet, dass sich die Ausbildung von Salzausblühungen durch Blattkapillaren erklären lassen, die entlang der Grenzfläche zwischen Fugendeckmörtel und Ziegel sowie zwischen Salzspeichermörtel und Ziegel auftreten. Dies bestätigt sich in der Übersichtsaufnahme des petrografischen Dünnschliffes eines Sandwichbohrkerns aus der Musterfläche 3 (Abb. 83a). Im Gegensatz zur fehlenden Anbindung an den Ziegel besteht zwischen Fugemörtel und Salzspeichermörtel eine Verbindung (Abb. 83b). Das Gefügebild des Fugemörtels ist mit seinem hohen Bindemittelanteil dem des ursprünglichen Fugemörtels sehr ähnlich (Abb. 83c), nur dass darin keine Restklinkerkörner von Zement vorhanden sind, sondern die typischen Bestandteile eines natürlichen hydraulischen Kalkes (Abb. 83d).

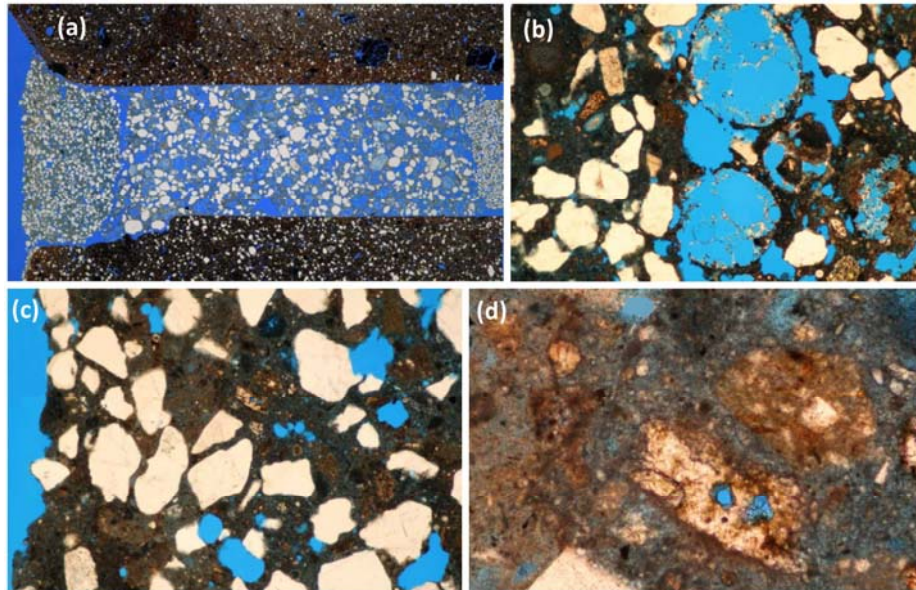


Abb. 83: Dünnschliff eines Sandwichbohrkerns aus Musterfläche 3 (Außenseite links). (a) Übersicht, lange Bildkante: 36 mm, parallele Polarisatoren; (b) Kontaktbereich Fugenmörtel (links) und Salzspeichermörtel (rechts), lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (c) Fugenmörtel, lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (d) Detail: Feinkorn-/Bindemittelanteil, lange Bildkante: 0.5 mm, parallele Polarisatoren.

4.2.9 Modifizierung des Instandsetzungskonzeptes

Aufgrund der im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten zusätzlichen Untersuchungen, die in dieser Form bisher noch an keinem Bauwerk erfolgten, musste das Instandsetzungskonzept modifiziert werden. Die besondere Problematik stellt die hohe Belastung des Mauerwerks durch Halit dar, welche allerdings alle Bauwerke im Küstenbereich betrifft. Während Einträge aus der Hauptquelle für die Gipsbildung im Außenbereich, also die hohe SO_2 -Belastung der Atmosphäre, durch Luftreinhaltemaßnahmen in den vergangenen 25 Jahren deutlich verringert werden konnten, bleibt der Eintrag von Natriumchlorid und anderen Bestandteilen von Seesalz auch zukünftig konstant. Deshalb muss das Instandsetzungskonzept die bereits vorhandenen Halitgehalte und den zusätzlichen Eintrag berücksichtigen. Weiterhin gilt es grundsätzlich zu bedenken, dass bei jeder Instandsetzung von Ziegelmauerwerk dem Ziegel eine höhere Erhaltungspriorität zugewiesen wird als dem Mörtel.

Daraus resultiert der ursprünglichen Instandsetzungsansatz möglichst das Natriumchlorid von den Ziegeln fernzuhalten, bzw. diesen Anteil im Ziegel, wenn möglich, zu reduzieren. Wird letzteres angestrebt, so kann dies nur über die Trocknungsphase erfolgen. Das über die gesamten Ziegeloberflächen in unterschiedlichem Maß abhängig vom Oberflächenzustand eingedrungene Wasser löst das Natriumchlorid je nach Regendauer an oder auf, analog das über die Fugen eingedrungene Wasser. Dies kann sich je nach Saugfähigkeit auch noch von dort lateral im Ziegel z.B. hinter der Brennhaut ausbreiten. Der Porenraum des Mörtels sollte deshalb so beschaffen sein, dass Wasser während der Trocknungsphase mit dem hauptsächlich darin gelösten Salzen, im Wesentlichen

Natrium und Chlorid, über den Kapillarporenanteil in den Mörtel, in diesem Fall in den Salzspeichermörtel eindringt und in den Luftporen und Leichtfüllstoffen kristallisiert, analog dem Prinzip eines Sanierputzes bzw. Kompressenputzes. Vorausgesetzt wird dabei eine schnellere Trocknungsgeschwindigkeit des Mörtels als des Ziegels. Außerdem muss eine gute Fugen- und Salzspeichermörtelanbindung in der Fuge am Ziegel bestehen, damit der Transport nicht unterbrochen wird. Praktisch konnte dies durch die Ausführenden nicht umgesetzt werden, wie die kombinierten Untersuchungen zeigten. Zumeist waren an den Fugenflanken nicht nur Blattkapillaren ausgebildet, sondern in erheblichem Umfang auch Durchströmungsporen und Fugenflankenabrisse, so dass der Feuchtetransport vor allem über diesen Bereich sowie die Randzone des Ziegels erfolgte, wie sich anhand der Salzausblühungen an der Musterfläche 1 nachvollziehen lässt.

Hinsichtlich der Auswahl von Fugen- bzw. Mauermörtel und der praktischen Durchführung der Neuverfugung kommt deshalb nur ein Instandsetzungskonzept in Betracht, bei dem die Fugenoberflächen nur wenig Wasser aufnehmen. Dadurch kommt es bei kurzen Regenereignissen gar nicht erst zu einer Auflösung der leichtlöslichen Salze. Das Gefüge des Verfugmaterials sollte dann soweit wie möglich dem ursprünglichen Fugenmörtel entsprechen. Das Gefüge des Fugendeckmörtels in Musterfläche 3 erfüllt diese Anforderung bereits weitgehend, allerdings ist seine Wasseraufnahme noch zu groß und das scheckige Erscheinungsbild ist nicht tolerierbar.

Die Wasseraufnahme des Fugenmörtels sollte zwischen derjenigen der rückgewitterten Ziegel (Maximalwert) und den Ziegeln mit Brennhaut liegen, was durch eine entsprechende Sieblinie und einen höheren Bindemittelanteil zu erzielen ist, auch ohne dem Material ein Hydrophobierungsmittel zuzusetzen. Auch hier muss eine sehr gute Fugenflankenhaftung z.B. durch den Zusatz einer Vergütung (Redispersionspulver) erzeugt werden, damit bei Regen mit starkem Winddruck keine großen Wassermengen in die Randzone gepresst werden.

Statt des Salzspeichermörtels wird bei desolatem Mauermörtel dieser durch einen Kalkzementmörtel ersetzt, zunächst um das Mauerwerksgefüge zu stabilisieren. Zugleich dient dieser Mörtel als Tiefenverfugung bzw. als erster Fugenmörtel eines ebenfalls zweilagigen Aufbaus. Der Mörtel wird nur soweit aus der Fuge herausgekratzt, dass der neue Fugendeckmörtel noch gut auf diesem haftet und auch an die Fugenflanken gepresst werden kann. Anstatt im erdfeuchten Zustand ist schon eher mit einer plastischen Mörtelkonsistenz zu arbeiten, die aber nicht aus der Fuge herausläuft.

Mit diesem Konzept wird auf eine mögliche Salzreduzierung der Ziegel über den lateralen Wassertransport in den Mörtel während der Trocknungsphase verzichtet, weil dies baupraktisch nicht durchführbar ist. Stattdessen wird die Wasseraufnahme soweit verringert, dass sie im Bereich der verschiedenen Oberflächenzustände der Ziegel liegt. Damit sind Wasseraufnahme und Wasserabgabe, soweit wie es der Istzustand ermöglicht, senkrecht zur Ziegel- und Fugenmörteloberfläche gleichgerichtet und der laterale Transport so stark wie möglich reduziert.

Durch die der Durchführung der bisherigen Maßnahmen begleitenden Arbeiten im Forschungsvorhaben konnte beobachtet werden, dass der Materialverlust der Ziegel z.B. in Bauabschnitt 1 teilweise weiterhin relativ hoch ist. Deshalb muss bei den folgenden Bauabschnitten eine größere Anzahl von Ziegeln durch geeignete Ersatzziegel ausgetauscht werden oder mit geeigneten Anstrichmassen überarbeitet werden, als es bisher der Fall war. Zudem sollte für ausgewählte, offensichtlich sehr stark versalzene Mauerwerkspartien eine gezielte Kompressenentsalzung vor der Neuverfugung doch noch in Betracht gezogen werden. Beispiele bildet Mauerwerk im Bereich defekter Regenrinnen und auf der Westseite unter den Fensterbänken.

Im Innenbereich, in denen das Mauerwerk einschalig ist, wie z.B. in den Wendeltreppenzugängen zum Dachboden und die Innenseiten der Giebel, ließen sich teilweise starke Schäden der Ziegel und des Mauermörtels detektieren. Der ursprünglich vollflächig aufgetragene Kalkputz war in vielen Bereichen nicht mehr vorhanden. Je nach Wetterlage trocknen die Wände nach außen oder innen ab. Dabei werden die leicht löslichen Salze mobilisiert und kristallisieren jeweils in der außen oder innen liegenden Verdunstungszone im Material. Deshalb sollte auf den Innenseiten unbedingt ein funktionsdifferenziertes Sanierputzsystem appliziert werden, um die Schädigung des originalen Materials zu minimieren und die Salze stattdessen in die großen Poren des Putzsystems einlagern. Das Putzsystem besteht aus einem Vorspritzmörtel als Haftvermittler, einem hydrophilen Salzspeicherputz mit äußerst großem Porenvolumen und einem hydrophoben Sanierputz gemäß den Anforderungen nach WTA. Alternativ könnte auch ein Kompressenputz aufgetragen werden, der nicht hydrophob ausgestattet ist, so dass die Salze bis zu dessen Oberfläche durchwandern können. Die an der Oberfläche kristallisierenden Salze wären dann von Zeit zu Zeit zu entfernen (abbürsten und auffangen).

4.3 Wasserturm Norderney

4.3.1 Historie

Der weithin sichtbare Wasserturm der Insel Norderney entstand im Jahr 1929 und wurde als Ziegelmauerwerk errichtet, wobei die Vormauerschale aus Hartbrandklinkern besteht (Abb. 84a). Bei den in das Mauerwerk einbindenden Decken handelt es sich um Stahlbetonbauteile, ebenso besteht der Wasserbehälter aus Stahlbeton. Um die Last aufnehmen und sicher über das Mauerwerk ableiten zu können, wurde die den Wasserbehälter tragende Decke durch sich kreuzende Unterzüge verstärkt. Die Decken sind zumindest im Auflager durch Korkplatten von dem Mauerwerk entkoppelt (Abb. 84b). Innenseitig war das Mauerwerk verputzt und beschichtet. Kondensat wurde über Öffnungen der innenliegenden Gebäudedecken nach unten abgeführt.

Eine größere Instandsetzung erfolgte 1991, welche eine Isolierung der Hauptleitung beinhaltete sowie Maßnahmen an der Gebäudehülle, die sich aber nicht im Detail benennen lassen. In diesem Zusammenhang dürfte auch die Applikation von Wand- und Bodenfliesen in den Räumen fast aller Stockwerke stehen, welche das Erscheinungsbild



Abb. 84: Wasserturm auf Norderney. (a) Ansicht aus Richtung Jann-Berghaus-Straße; (b) Konstruktionsmerkmal: Auflager der Stahlbetondecke auf Kork; (c) Wandfliesen bilden das Charakteristikum der oberen Stockwerke des Wasserturms.

bis ins Jahr 2009 prägte (Abb. 84c). 1994 erhielt der Wasserbehälter eine Edelstahlabdeckung und 1998 wurde die Dachhaut mit einer Kupferblechabdeckung erneuert.

4.3.2 Schadensbeschreibung

Im unteren Bereich erscheint das Mauerwerk des Wasserturms nahezu vollständig intakt (Abb. 85a), während mit zunehmender Höhe insbesondere nahe den Bauwerksecken (Abb. 85b) und unter Gesimsen (Abb. 85c) vertikale Risse im Mauerwerk auftreten, an denen sich massive Kalkfahnen gebildet haben. Die Risse treten bevorzugt dort an der Außenhülle auf, wo die Stahlbetondecken in das Mauerwerk einbinden. Die Risse können eine Länge von bis zu 3 m erreichen, liegen aber zumeist im Bereich von 1 m und verlaufen vertikal durch die Stoßfugen und durchtrennen auch in hohem Maß Hartbrandklinker. Weiterhin weist das Fugennetz mit zunehmender Höhe auch Fehlstellen auf, die beispielhaft in Abb. 85d dargestellt sind, sowie vereinzelt Steinschäden.

Einen weiteren Schwachpunkt und damit zugleich Eintragsweg für Wasser bildet der Dachrandanschluss in dem Zusammenspiel zwischen Dachneigung und Dimensionierung der Kastenregenrinne (Abb. 86a). Zudem kann Regenwasser bei starkem Winddruck auch unter die nicht fachgerechte, leicht aufgewölbte Verbindung der Kupferbleche gelangen (Abb. 86b), insbesondere bei Regen und Westwind. Der Windeinfluss bei Regen lässt sich an der stark einseitigen Benetzung der Westseite am oberen Teil des Wasserturms nachvollziehen, wie Abb. 86c beispielhaft belegt.

Aufgrund der nahezu wasserundurchlässigen Hartbrandklinker kann das eingedrungene Wasser nicht ausreichend schnell über das Fugennetz trocknen und verteilt sich unregelmäßig von Rissen und vom Dachrand ausgehend im Mauerwerk. Nach innen kann selbst bei zusätzlicher Zwangsbelüftung das Wasser aufgrund der Wandbekleidung aus Fliesen und der Mehrfachbeschichtung oberhalb der Fliesen und der Decke nicht abge-

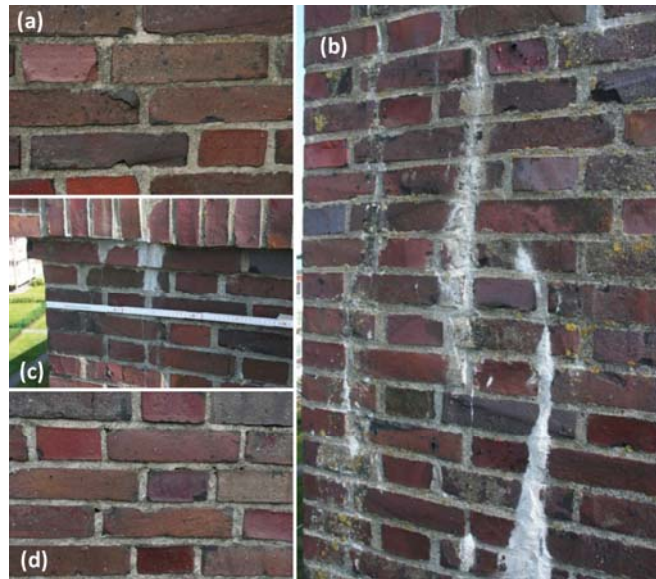


Abb. 85: Schäden an der Vormauerschale des einschaligen Mauerwerks des Wasserturms. (a) leichte Rückwitterung und Bewuchs auf den Fugen, bei ansonsten völlig intaktem Verbund; (b) charakteristische Kalkabläufer entlang vertikaler Rissen nahe der Gebäudeecken in Höhe der einbindenden Stahlbetondecken; (c) Risse mit Kalkablagerungen treten auch unter den Gesimsen auf; (d) mit der Höhe zunehmende Fehlstellen im Fugenmörtel.

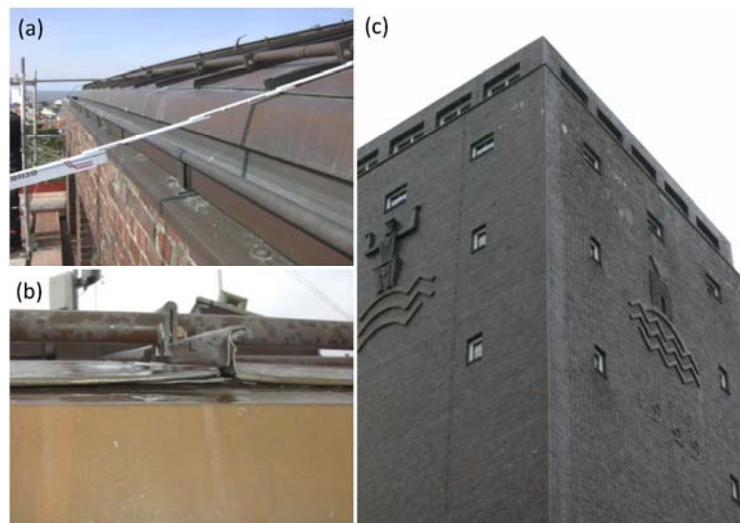


Abb. 86: Dachrandbereich und Mauerwerk des Wasserturms bei Regen. (a) Konstruktionsmangel im Hinblick auf die Wasserabführung über die Regenrinnen. Das Wasser schießt bei starkem Regen mit Wind über die Regenrinne hinweg und läuft an der Fassade hinab, (b) Entlang der Kupferfalz kann Regenwasser bei starkem Wind in den Dachaufbau gedrückt werden und von oben in das Mauerwerk gelangen, (c) Bei starkem Westwind wird das Regenwasser über die Schäden in der Außenhülle in das Mauerwerk gedrückt.

geben werden und führt dort zu Schäden, wobei sicherlich viele schadhafte Bereiche noch unter der keramischen Bekleidung verborgen sind. Darauf lassen indirekt auch

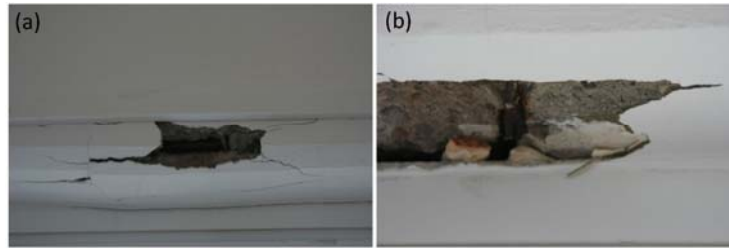


Abb. 87: Schäden am Fenstersturz im Aussichtsraum. (a) starke Rissbildung im Sturzbereich durch von oben/außen eingedrungenes Wasser und dadurch ausgelöster Bewehrungskorrosion; (b) Gipsspachtel unter dem aus Zement bestehenden Sperrspachtel.

Schäden in den Fensterstürzen oberhalb des Fliesenschildes z.B. im obersten Raum des Wasserturms schließen. Der Schaden ist in Abb. 87 vor (a) und nach (b) der Öffnung zu sehen. Nach dem Öffnen der Schadenszone konnte unter dem aus Zement bestehenden Sperrspachtel eine Lage aus Gipsspachtel festgestellt werden. Durch diese Gipsschicht wurde der Schaden erheblich beschleunigt, wenn sie nicht sogar schadensursächlich war.

Im oberen Umgang um den Wasserbehälter, der dort mit einem Edelstahldeckel versehen ist, haben sich an den Unterzügen aus Stahlbeton teilweise bereits Schäden entwickelt, wie die Übersichtsaufnahme (Abb. 88a) bestätigt, in der auch die keramische Wandbekleidung der letzten großen Instandsetzungsmaßnahme sichtbar ist. Nach dem Entfernen der gelösten Betonschale wird die korrodierte Bewehrung sichtbar, welche die Ursache für Rissbildung und Betonschädigung ist. Abb. 88b gibt den Zustand nach Entfernen des losen Betons mit Beschichtungsaufbau im Detail aus entgegengesetzter Blickrichtung wieder. An der oberen Kante der Schadensstelle lässt sich noch weißes Beschichtungsmaterial auf der oberen Rissflanke nachweisen, woraus sich schließen lässt, dass der Riss bereits vor der letzten Beschichtungsmaßnahme vorhanden war und in diesem Zuge nicht saniert worden ist, da sonst an dieser Stelle keine Farbe hätte sein dürfen.

Entlang feiner Haarrisse oberhalb des Fliesenschildes an der Wand oder an der Decke nahe dem Außenmauerwerk dringt Wasser in das Bauwerk ein, wie der Wassertropfen am Riss eindeutig belegt (Abb. 88). Durch Bewegungen des Wasserturms, sicherlich auch durch das im Mauerquerschnitt vorhandene, ungleichmäßig verteilte Wasser infolge unterschiedlichen Spannungsauf- und-abbbaus verstärkt, sind auch Risse im Fliesenschild, vornehmlich in Eckbereichen entstanden. Über die Risse trat an Calciumhydroxid gesättigtes Wasser aus und es bildeten sich infolge CO_2 -Zutritts aus der Luft Calcitsäume entlang der Risse (Abb. 88d).

An den Innenseiten der Außenwände rund um den aus Stahlbeton bestehenden Wasserbehälter haben sich teilweise starke Salzausblühungen in Abhängigkeit von den am stärksten durch Wassereintrag betroffenen Seiten (wechselfeuchte Zone) gebildet. Ein Beispiel ist in Abb. 89a gezeigt. Der Wasserbehälter selbst lässt am nordwestlichen Be-

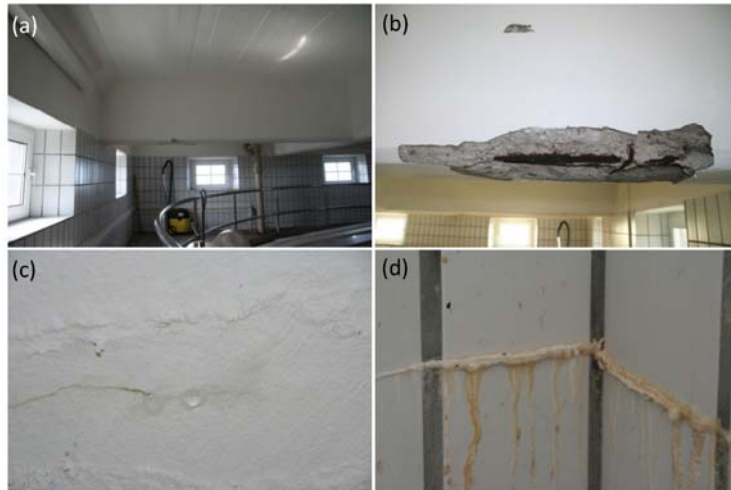


Abb. 88: Schäden im Raum direkt über dem Wasserbehälter (Umgang). (a) Übersicht mit Blick auf die Westwand mit Schaden am Unterzug; (b) Zustand nach Öffnung des Unterzuges (entgegengesetzte Blickrichtung); (c) nach innen über Risse eindringendes Wasser; (d) Calcitbildung durch Transport von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -gesättigter Lösungen an die Rissoberflächen.

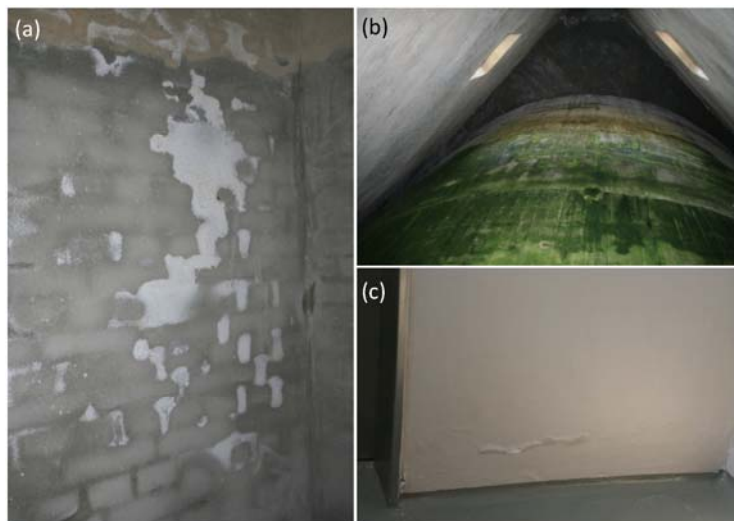


Abb. 89: Raum mit Wasserbehälter und Treppenhaus. (a) expositionsabhängige Salzausblühungen; (b) vereinzelte Schäden an der Außenhülle des Wasserbehälters Algenbesiedelung; (c) Blasenbildungen auf der Innenseite der Außenwände des Treppenhaus und in den Fensterleibungen.

reich seiner Außenhaut starke Algenbildung erkennen. Es liegen allerdings nur wenige Oberflächenschäden im Stahlbeton vor (Abb. 89b).

Im Treppenhaus auf der Südostseite wurde auf eine keramische Bekleidung verzichtet. Stattdessen finden sich überwiegend sehr dichte, d.h. nur geringfügig wasserdampfdurchlässige Beschichtungen an der Innenseite der Außenwand und auf dem Boden, so dass sich hier Blasen gebildet haben. Häufig handelt es sich bei dem Spachtel, mit dem die Wände geglättet wurden, um Gipsputz, der durch partielle Auflösung und an-

schließende Rekristallisation zur Blasenbildung beigetragen oder diese sogar verursacht hat. In den weiter unten gelegenen Räumen, mit Ausnahme der Wasseraufbereitung im Souterrain, liegen nur noch verputzte und beschichtete Wände und keine keramische Bekleidung vor (Abb. 89c).

4.3.3 Materialkenndaten

Für die Materialkenndaten kann analog zur Grundschule auf ein früheres Gutachten eines Projektpartners zurückgegriffen werden [39], aus welchem die wesentlichen Aussagen zum Mauerwerk und auch zum Beton der Stahlbetondecken einschließlich Beschichtung wiedergegeben werden sollen. Die maximalen Wasseraufnahmen bei Wasserlagerung für die verschiedenen Konstruktionsbaustoffe, also dem Mauerwerk und den Stahlbetondecken ist in Abb. 90a dargestellt. Der Hartbrandklinker nimmt nur äußerst geringe Mengen an Wasser auf, d.h. die Wasseraufnahme kann nur über das Fugennetz erfolgen, sei es über die Poren oder die Fugengrenzfläche zum Stein. Der Mauermörtel hingegen kann das Wasser aufgrund seiner maximalen Wasseraufnahme in den Mauerwerksquerschnitt hinein weiterleiten. Der Putz auf dem Beton kann mehr Wasser aufnehmen als der Beton selbst. Es handelt sich somit bei dem dickeren Putz auf dem Beton nicht um einen Sperrmörtel.

Zwecks möglichen Ziegel- und Mörtelaustausches wurde der Mauermörtel auf seine chemische Zusammensetzung an zwei Proben untersucht, deren Ergebnis in Abb. 90b dargestellt ist. Ergänzend erfolgten polarisationsmikroskopische Analysen am Mauermörtel und am ursprünglichen Fugenmörtel. Die chemische Zusammensetzung kann relativ stark variieren, da der Mauermörtel vor Ort gemischt wurde. Aus der chemischen

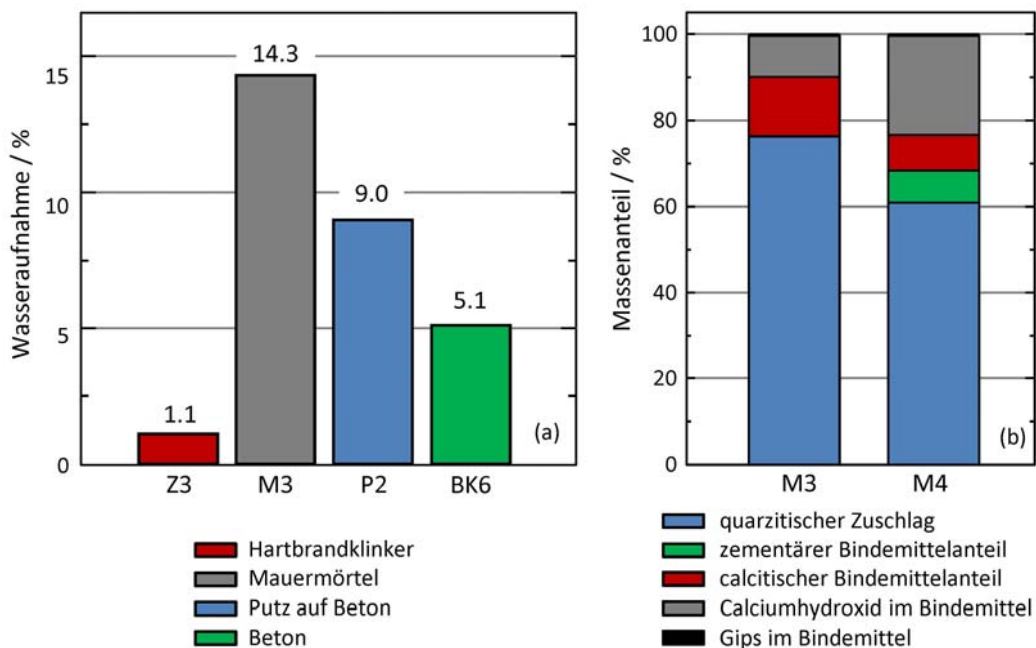


Abb. 90: Ausgewählte Kenndaten der Baustoffe. (a) maximale Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck; (b) chemische Zusammensetzung des Mauermörtels.

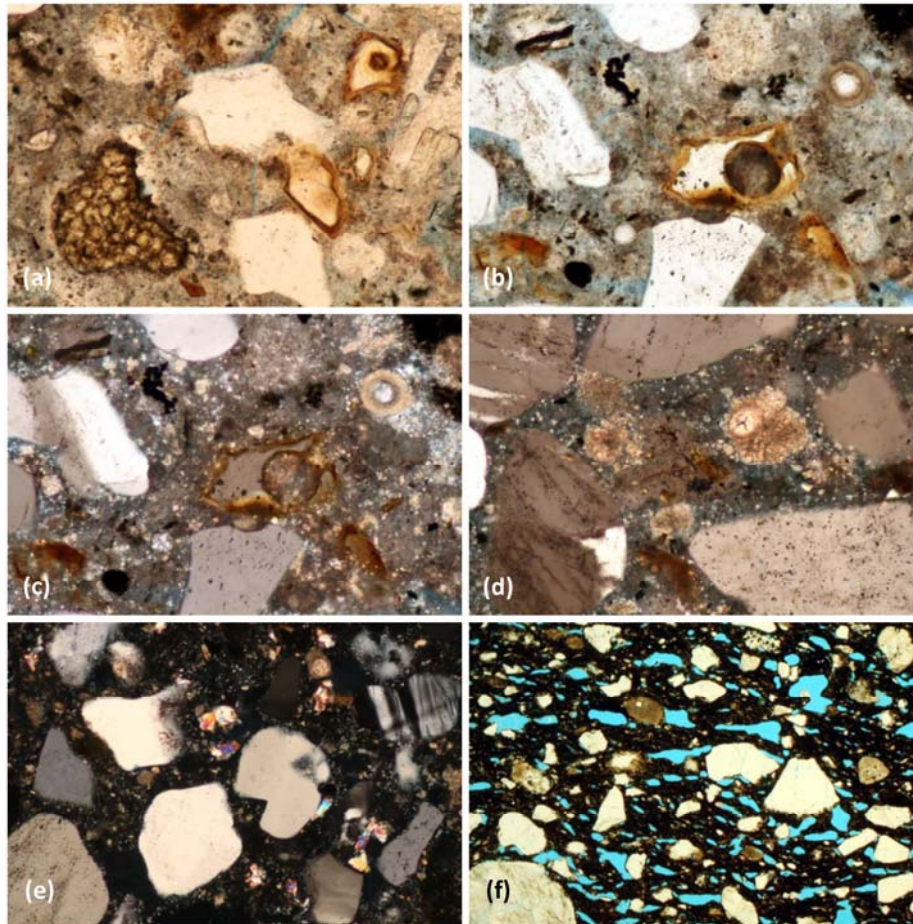


Abb. 91: Polarisationsmikroskopie der Baumaterialien. (a) Restklinkerkorn im Fugenmörtel (linke Bildseite), parallele Polarisatoren; (b) Hüttensand mit Eisenoxid-Hydroxid im Fugenmörtel, parallele Polarisatoren; (c) gleicher Ausschnitt wie b, aber teilgekreuzte Polarisatoren; (d) feiner Kalkzusatz, gekreuzte Polarisatoren; (e) Portlandit im uncarbonatisierten Bindemittel, gekreuzte Polarisatoren; (f) Gefüge des Hartbrandklinkers, gekreuzte Polarisatoren. Lange Bildkante: 0,5 mm (a–e), 1,0 mm (f).

Analyse lässt sich für M3 ein Bindemittel–Zuschlag-Verhältnis von 1 : 3,2 und für M4 von 1 : 1,6 in Gewichtsanteilen berechnen.

Neben dem Zement, der alleinigen hydraulischen Bindemittelkomponente im Fugenmörtel der Grundschule, liegen in den Mörteln am Wasserturm auch Puzzolane vor. Das betrifft Fugen- und Mauer­mörtel gleichermaßen. Neben den charakteristischen Restklinkerkörnern (Abb. 91a) wurden Hüttensand bzw. kleine Schlacken­körner mit glasiger Matrix und häufig noch braunen Säumen durch Eisenverbindungen (Abb. 91b und Abb. 91c) nachgewiesen. Darüber hinaus enthalten sowohl der Mauer- als auch der Fugenmörtel kleine z.T. völlig runde Calcitpartikel, die Abb. 91d bei vollständig gekreuzten Polarisatoren wiedergibt, so dass für die chemische Analyse auch zu berücksichtigen ist, dass nicht sämtlicher Calcit aus der Carbonatisierung des Portlandits (Calciumhydroxid) hervorgegangen ist, also der calcitische Bindemittelanteil kleiner sein muss.

Tab. 10: Carbonatisierungstiefe, Bewehrungsüberdeckung, Druckfestigkeit und Beschichtung

Probe	Carbonatisierungstiefe	Armierung	Druckfestigkeit	Bemerkungen
BK 1	im Rissbereich: 51 mm außerhalb Rissbereich: 25 mm	am BK nicht sichtbar	–	2–4 mm Schlämme, Riss von 4–141 mm bzw. 3–85 mm
BK 2	24 mm	am BK nicht sichtbar	24.0 N mm ⁻²	3–5 mm Schlämme
BK 3	27 mm	Armierung 11 mm Ø Betonüberdeckung: 12 mm	10.8 N mm ⁻²	–
BK 4	ungleichmäßig (unabhängig v. Rissen)	Armierung 8 mm ØBetonüberdeckung: 3 mm	-	1–3 mm Schlämme, Riss von 3–119 mm bzw. 3–105 mm
BK 5	41 mm	am BK nicht sichtbar	-	2–4 mm Schlämme, Riss mit EP verpresst, 2–165 mm
BK 6	35 -38 mm	am BK nicht sichtbar	18.8 N/mm ⁻²	2–5 mm Schlämme

Für den Mauermörtel wurde aufgrund der Kornzusammensetzung (überwiegend Quarzsand), der Kornrundung und des engen Korngrößenspektrums analog der Grundschule Dünen sand eingesetzt. Der Zuschlag des Fugenmörtels besitzt nahezu die gleiche Zusammensetzung, nur mit dem kleinen Unterschied, dass Überkorn hinzugegeben wurde. Der Bindemittelanteil wurde wiederum für den Fugenmörtel erhöht, wie sich grob aus den polarisationsmikroskopischen Analysen abschätzen lässt. In Teilbereichen erfolgte noch keine Carbonatisierung des Portlandzements zwischen den C-S-H-Phasen, wie Abb. 91e bestätigt. Der Hartbrandklinker zeigt die typischen runden länglichen Poren von Material, welches verglast ist, also die Sintergrenze erreicht hat. Nur die Quarzkörner repräsentieren noch den Ausgangszustand (Abb. 91f).

Um beurteilen zu können, ob im Einbindungsbereich der Stahlbetondecken der Beton bereits geschädigt ist, wurden an Bohrkernen die Carbonatisierungstiefe, die Tiefenlage der Bewehrung sowie deren Zustand und die Druckfestigkeit bestimmt. Die Ergebnisse fasst Tab. 10 zusammen, in der auch der Schichtaufbau auf dem Beton angegeben ist, wobei die Abfolge von Instandsetzungsmaßnahmen an der Betonoberfläche letztlich nur mittels mikroskopischer Analyse wiedergegeben werden kann. Abb. 92a vermittelt einen Eindruck von dem Schichtaufbau auf dem Beton. Dabei weist die Außenseite zur linken Bildseite. Folgender Aufbau ließ sich von außen nach innen bestimmen:

- drei Beschichtungslagen mit einer Dicke von 540–720 µm (Abb. 92b)
- zwei Lagen Zementspachtel mit Quarzzuschlag und in der unteren Lage zusätzlich Flugasche mit einer Stärke von ca. 3100–3350 µm

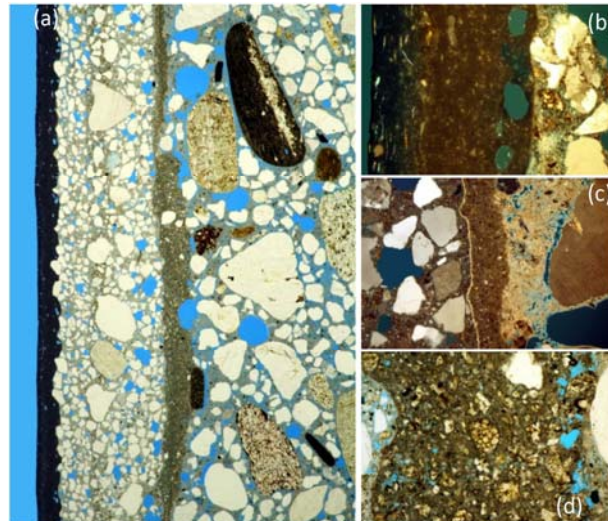


Abb. 92: Beschichtungsaufbau auf Beton. (a) Übersicht (von außen, links, nach innen): zwei Lagen zementärer Spachtel, eine Zementlage als Haftvermittler und Beton, parallele Polarisatoren; (b) drei aufeinanderfolgende Beschichtungslagen, teilgekreuzte Polarisatoren; (c) Übergang zwischen Zementspachtel und Beton mit starker Carbonatisierung des Betons, teilgekreuzte Polarisatoren, (d) Zementlage auf Beton, parallele Polarisatoren. Lange Bildkante: 15 mm (a), 1.0 mm (b–d).

- eine Lage reines Bindemittel (Purzement) von ca. 250–1110 μm Dicke
- Beton

In Abb. 92c ist der Übergang von der unteren Zementspachtellage über die Purzementlage bis zum Beton bei unvollständig gekreuzten Polarisatoren gezeigt. Die reine Zementlage weist an der Oberfläche einen Calcitsaum auf und scheint selbst nur begrenzt carbonatisiert zu sein, während die Oberflächenzone des Betons vollständig carbonatisiert ist. Die Abb. 92d ist eine Detailaufnahme der reinen Bindemittelschicht, in welcher der hohe Anteil an Zementklinkerkörnern sichtbar ist.

Vom Beton selbst wurde an dieser Probe auch die Zusammensetzung bestimmt, um zu überprüfen, ob die im Beton bzw. direkt angrenzend zum Beton gemessenen Chloridgehalte den zulässigen Grenzwert bezogen auf das Bindemittel überschreiten. Das Ergebnis dieser von der MPA durchgeführten Untersuchungen ergab ein Mischungsverhältnis von 1:10.5 ($\pm 15\%$), einen Zementgehalt von $(181 \pm 18) \text{ kg m}^{-3}$ und einen Zuschlaggehalt von $(1900 \pm 95) \text{ kg m}^{-3}$.

4.3.4 Salzbelastung und Feuchteparameter

Am Beispiel der Wetterseite (Westen) soll die Feuchteverteilung im Mauerquerschnitt unter Verwendung der Daten aus [39] erläutert werden, da sich hier bereits die Charakteristika zeigen, die aus dem Schadensbild resultieren. Das Profil setzt sich aus dem unteren Teil, mit von außen von einem Leiterwagen der Feuerwehr gewonnenen Bohrmehlproben, und einem oberen Teil, mit von innen entnommenen Bohrmehlproben, zusammen, wobei sich eine Überschneidung ergibt.

Im unteren Teil lässt sich keine höhenabhängige Feuchteverteilung feststellen, allerdings nimmt der Feuchtegehalt von außen nach innen bis hinter die vordere Hartbrandklinkerlage (eine halbe Steintiefe) oder zwei Klinkerlagen (eine ganze Steintiefe) zu. Durch den Wind trocknen die Fugen relativ schnell aus, aber im Mauerwerksquerschnitt erfolgt der Wassernachschub über die Risse schneller als eine Trocknung möglich ist. Die Höchstwerte entsprechen einer vollständigen Durchfeuchtung, wenn die maximale Wasseraufnahme des Mauermörtels zugrundegelegt wird.

Nach oben setzt sich die unregelmäßige Verteilung der Feuchtegehalte weiter fort, nur von innen aus betrachtet, wobei keine Abhängigkeit der Feuchteverteilung von der Art des Belages auf den Innenseiten der Außenwände erkennbar ist.

Bei den früheren Untersuchungen am Wasserturm [39] wurden auch Salzmessungen durchgeführt, die an dieser Stelle kurz diskutiert werden sollen. Bei den Untersuchungen wurde in mehreren Messachsen sowohl auf der Außenseite (West, Süd) als auch im Inneren die Salzverteilung in Bohrmehlproben bestimmt. In jeder der Messachsen wurden entsprechende Bohrungen in die Fugen in unterschiedlichen Höhen ausgeführt, so dass ein recht umfangreiches Datenmaterial vorliegt. In der Mehrzahl der Proben wurden allerdings nur die Anionen Sulfat, Nitrat und Chlorid bestimmt. Lediglich in ausgewählten Proben wurden auch die Kationen Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium bestimmt. Wie schon in Kap. 4.2.4 ausgeführt wurde, waren auch die Daten vom Wasserturm aufgrund erheblicher Abweichungen bei den Ionenbilanzen schwierig auszuwerten. Auch in diesem Fall sind sicherlich teilweise die ungünstigen Elutionsbedingungen für teilweise erhebliche Kationenüberschüsse verantwortlich. Daneben gibt es aber doch eindeutige Hinweise in mehreren Proben darauf, dass die hohen Überschüsse auch durch die Gegenwart von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandit) verursacht sind, das im Vergleich zu Calcit eine deutlich höhere Löslichkeit aufweist und deshalb zu hohen Calciumüberschüssen führt, wenn lediglich die drei Anionen Sulfat, Nitrat und Chlorid bestimmt werden. Leider wurden keine pH-Wert-Messungen durchgeführt, die zur Klärung hätten beitragen können.

Daneben gab es auch einige Proben, in denen der Kationenüberschuss nicht durch Calcium sondern hauptsächlich durch Natrium verursacht ist. In diesen Fällen ist es am wahrscheinlichsten, dass der Überschuss durch nicht berücksichtigte Carbonat- bzw. Hydrogencarbonat-Gehalte verursacht ist. Auch dieser Befund ist angesichts der großen Mengen an Zement, die am Wasserturm verwendet wurden, nicht überraschend. Die Bildung von leicht löslichen Carbonaten, insbesondere von Natriumcarbonat ist unter diesen Bedingungen typisch [41]. Für den Einfluss einer bedeutenden zweiten Quelle für Natrium außer Seesalz spricht auch die Tatsache, dass nur eine mäßige Korrelation zwischen Natrium und Chlorid in den Proben vorliegt, in denen auch die Kationengehalte bestimmt wurden.

Im Vergleich zur Grundschule sind die Gehalte von Chlorid am Wasserturm geringer, was in Einklang mit der deutlich geringeren Wasseraufnahme des Mauerwerks steht und bestätigt, dass neben dem direkten Seesalzeintrag auch die nasse Deposition von Seesalz mit Niederschlägen ein wesentlicher Eintragspfad ist. Auch die Sulfatgehalte erreichen nicht vergleichbar hohe Werte, wie sie in den Proben der Grundschule

teilweise beobachtet wurden. Die Tiefenprofile belegen, dass in der Regel analog zur Grundschule die höchsten Konzentrationen jeweils in den äußeren Bohrsegmenten der Fugenmörtel vorliegen. Aufgrund der fehlenden Porosität der Hartbrandklinker findet aber nahezu kein Eintrag von Salzen aus den Fugen in den Klinker statt. Gleichzeitig sind die Hartbrandklinker offensichtlich deutlich weniger durch den direkten Eintrag von SO_2 betroffen. Während also Salze einen erheblichen Anteil an der Rückwitterung der Ziegeloberflächen haben, stellen sie am Wasserturm allenfalls in einigen Bereichen mit ungünstiger Wasserführung, wo sie sich anreichern konnten ein Problem dar. Es wurde deshalb auf die zerstörende Entnahme weiterer Proben und eine umfassende Salzcharakterisierung verzichtet.

4.3.5 Wasseraufnahme und Trocknungsmessungen

Bereits im Rahmen der Gutachtenerstellung [39] wurde die Wasseraufnahme des Verbundes mittels der Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke in verschiedenen Höhen überprüft, wobei im Vordergrund die Ermittlung der Wasseraufnahme des augenscheinlich intakten Verbundes stand, um indirekt zu ermitteln, ob über ggf. vorhandene Blattkapillaren oder größere Poren an der Fugenflanke Wasser in das Mauerwerk eindringen kann. Nur auf diesem Weg lässt sich feststellen, bis zu welchem Grad der Fugenmörtel ausgetauscht werden muss. Bei Fehlstellen stellt sich diese Frage nicht, sie müssen in jedem Fall geschlossen werden. Die Fugen können je nach Exposition an der Oberfläche durch die klimatische Beanspruchung leicht aufgeraut sein, während auf der wetterabgewandten Seite zumindest im unteren Bereich Verschmutzungen vorherrschen und gelegentlich auch der Fugenglattstrich mit dem Fugeisen noch an der Oberfläche erkennbar ist.

Bei den Messungen mit der Franke-Platte wurden überwiegend Messungen in optisch intakten Bereichen durchgeführt, also in Bereichen ohne sichtbare Risse oder ihren Vorläufern. Im Vergleich dazu wurde an zwei Positionen gemessen, an denen kleinere Schäden (Risse) sichtbar waren. Risse in Fugenflanken oder im Hartbrandklinker, über die Wasser transportiert werden kann, äußern sich häufig in sichtbaren Calcitablagerungen (Abb. 93a). Damit das Wasser nicht über diese feinen, durch Calcit vermeintlich geschlossenen Haarrisse nach unten aus der Franke-Platte auslaufen konnte, wurden diese Stellen vorsorglich mit Kitt bedeckt (Abb. 93b).

Die Ergebnisse der Messungen sind in (Abb. 93c) dargestellt. Der Messpunkte MP 12 befand sich in einem Mauerwerksbereich mit kleineren Schäden. Messpunkt MP 13 ist eine Messung in einer ausgemauerten Fensteröffnung, bei der ein anderer Fugenmörtel verwendet wurde. Die Wasseraufnahmen an diesen beiden Positionen betragen 47 mL (MP 12) bzw. 147 mL (MP 13) in 15 Minuten und übersteigen die Wasseraufnahmen in den augenscheinlich intakten Flächen, die Werte zwischen 1 mL und 6 mL in 15 Minuten aufweisen, um ein Vielfaches. Selbst der höchste gemessene Wert von 147 mL in 15 Minuten (MP 13) gilt aber nach den Kriterien von Franke noch als akzeptabel im Hinblick auf die Schlagregensicherheit. Wie zu erwarten war, erfolgte die Wasseraufnahme ausschließlich über die Fugen und der Hartbrandklinker nahm über seine Sichtfläche

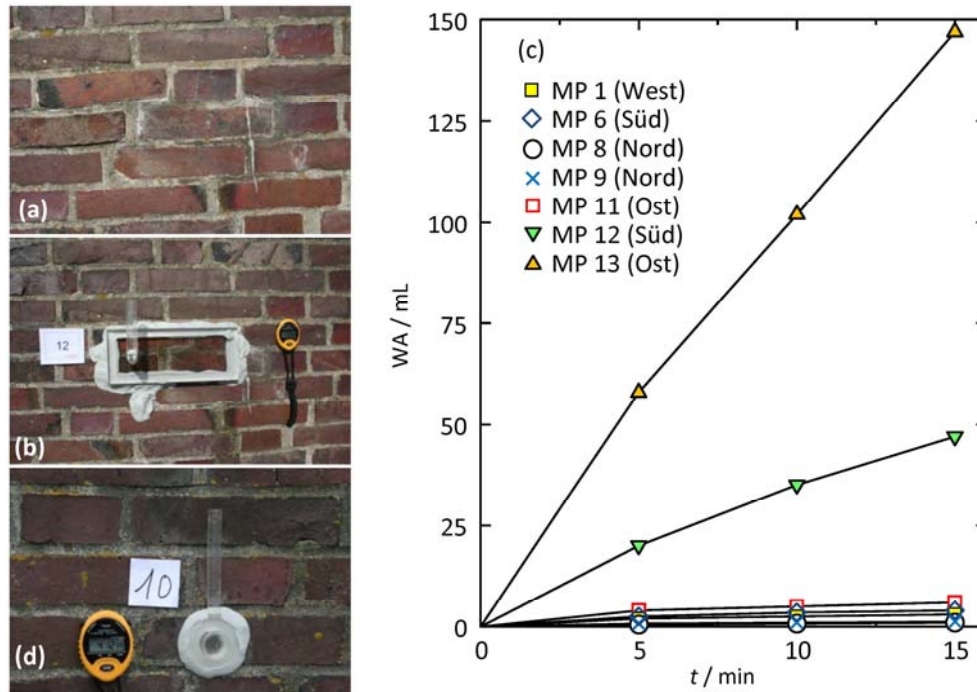


Abb. 93: Bestimmung der Wasseraufnahme mittels Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke und Wassereindringprüfer nach Karsten. (a) Bereiche mit geringen Kalkablagerungen indizieren unkontrollierten Wassertransport über Risse; (b) Wasseraufnahmemessung in Bereich a; (c) Vergleichsmessungen (MP 1–MP 11: Messungen in augenscheinlich intakten Bereichen, MP 12: leicht geschädigter Bereich, MP 13 ausgemauerte Fensteröffnung mit anderem Fugenmörtel); (d) Kontrollmessungen mit Karsten-Röhrchen.

kein Wasser auf. Prüfungen mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten blieben deshalb auf wenige Kontrollmessungen begrenzt (Abb. 93d).

Auf der Süd- und Westseite wurden im Rahmen dieses Vorhabens neue Wasseraufnahmemessungen des Verbundes mit der großen Karsten-Platte (GK) gemessen, wobei auch hier analog der Grundschule jeweils die Platte über einem Kontakt zwischen einer Stoßfuge und einer Lagerfuge angebracht wurde (Abb. 94a), mit Ausnahme einer Messung im oberen Bereich des Fenstersturzes auf der Südseite (Abb. 94b). Die vorgenannte Art der Messung hat den Vorteil, dass ein Vergleich der Wasseraufnahme objektübergreifend möglich ist. Insgesamt ist die Wasseraufnahme auch an den kritischen Kontaktpunkten von Stoß- und Lagerfuge sehr gering (Abb. 94c). Eine Ausnahme bildet der Riss in der vertikalen Fuge zwischen den Sturzklinkern auf der Südseite. Dabei verteilt sich aber der Großteil des Wassers entlang des Risses nach unten und nicht in das Mauerwerk hinein. Anders ist die Situation bei einer Neuausmauerung einer ehemaligen Fensteröffnung mit einem neuen Fugenmörtel, der eine deutlich höhere Wassermenge aufnimmt, ohne dass ein Fugenflankenabriss erkennbar ist (Abb. 94d). Der neue Klinker besitzt ebenso keine mit der kleinen Karsten-Platte messbare Wasseraufnahme, wie schon bei Messungen am Altbestand beobachtet wurde.

Versuche zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens des Mauerwerks am Wasserturm unter Verwendung der Messkammer blieben wegen der zu geringen Wasseraufnahme während der anfänglichen kapillaren Tränkung erfolglos. Hier zeigt sich gewissermaßen

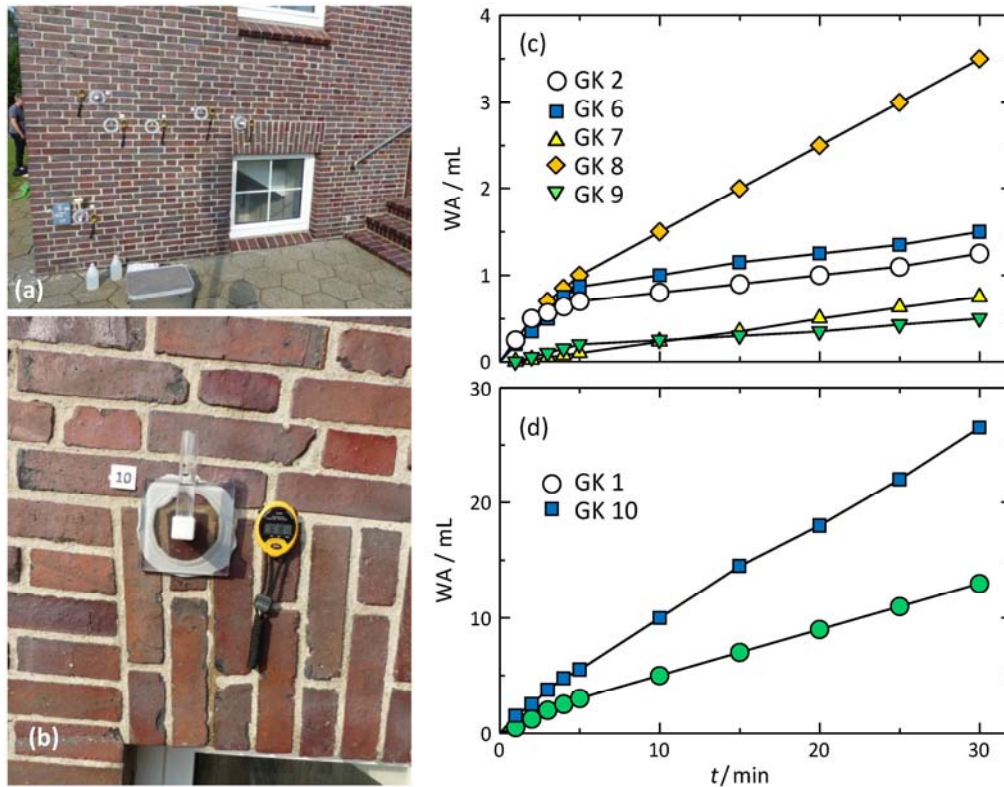


Abb. 94: Wasseraufnahmemessungen mit großer Karsten-Platte. (a) Messungen auf der Südseite (Übersicht); (b) erhöhte Wasseraufnahme im Bereich eines Fenstersturzes mit Riss; (c) Messwerte bei augenscheinlich intaktem Verbund; (d) Messwerte über dem Riss im Sturz (GK 10) und einer zugemauerten Fensteröffnung mit anderen Hartbrandklinkern und anderem Fugenmörtel (GK 1).

eine untere Grenze für die Wasseraufnahme, bis zur mit der hier entwickelten Kammer noch Messungen möglich sind.

4.3.6 Polarisationsmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen am Mörtel-Ziegelverbund

Analog zu den Untersuchungen an der Grundschule wurden auch am Wasserturm ergänzende mikroskopische Analysen an Verbundproben vorgenommen, wobei es ungleich schwieriger war aus dem Verbund aus Hartbrandklinkern Sandwichbohrkerne zu entnehmen. Abb. 95a zeigt den Bohrkern 1 in der Übersicht mit nach links weisender Außenseite. Die Übersichtsaufnahme spiegelt sofort den bereits beschriebenen Unterschied in der Zuschlagkorngröße zwischen Fugen- und Mauermörtel wider, wobei auch der Verlauf der Grenzfläche zwischen diesen beiden Mörteln anhand der größeren Pore und der feinkörnigen Verunreinigung sehr deutlich hervortritt. In der Übersichtsaufnahme ist zudem eine gute Haftung des Mörtels am Hartbrandklinker feststellbar. Erst bei stärkerer Vergrößerung fällt ein Riss an der oberen Fugenflanke auf, dessen Breite 10–20 μm beträgt (Abb. 95b). Bei vollständig gekreuzten Polarisatoren lässt sich anhand der optischen Eigenschaften (Interferenzfarbe) nachvollziehen, dass die Rissflanken vollständig carbonatisiert sind, wobei die Carbonatisierung nach oben sehr viel weiter in das Gefüge hineingreift als nach unten. Dort endet die Carbonatisierung in ca.

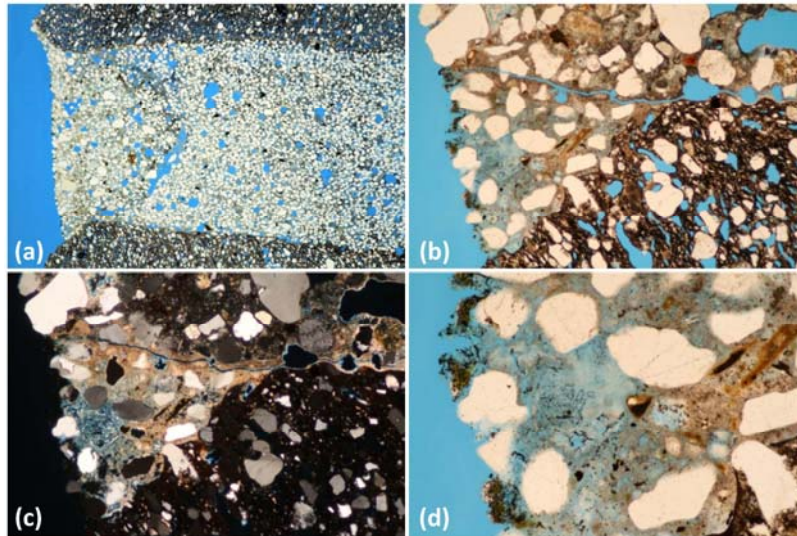


Abb. 95: Dünnschliff von Sandwichbohrkern BK1 senkrecht zur Oberfläche. (Außenseite links). (a) Übersicht, lange Bildkante: 18 mm, parallele Polarisatoren; (b) obere Fugenflanke mit Riss, lange Bildkante: 2.5 mm, parallele Polarisatoren; (c) gleicher Ausschnitt wie b, vollständig gekreuzte Polarisatoren; (d) Bindemittelabbau durch Mikroorganismen, lange Bildkante: 1.0 mm, parallele Polarisatoren.

50 μm bis maximal 100 μm Entfernung von der Rissflanke und ist scharf vom nicht carbonatisierten zementären Bindemittel abgegrenzt. In letzterem besitzt der Fugenmörtel ein sehr dichtes Gefüge, welches den Zutritt von CO_2 aus der Luft und Feuchtigkeit bisher nicht ermöglicht hat. Vereinzelt in der Bindemittelmatrix auftretende Carbonatpartikel stellen einen primären Zuschlaganteil oder einen Zusatzstoff dar (Abb. 95c).

Demgegenüber kann das Bindemittel des Fugenmörtels in der unmittelbaren Oberflächenschichtzone bis in eine Tiefe von mehreren Quarzkornlagen abgebaut sein, wobei der starke Bewuchs aus Algen und Schwärzepilzen maßgeblich daran beteiligt zu sein scheint (Abb. 95d).

Poren im Fugenmörtel weisen Säume aus nadeligen Kristallen auf bzw. sind teilweise gänzlich damit gefüllt. Abb. 96a stellt ein Beispiel für erstgenannte Kategorie bei parallelen Polarisatoren dar, während Abb. 96b mit teilgekreuzten Polarisatoren die Interferenzfarben erster Ordnung der zusammengewachsenen Kristalle wiedergibt. Abb. 96c zeigt die verwachsenen Kristalle einer aufgebrochenen Pore im Rasterelektronenmikroskop im Rückstreuelektronenmodus (BSE). Anhand des dazu gehörigen EDX-Spektrums lässt sich die Elementzusammensetzung bestimmen. Die Kristalle bestehen vor allem aus Silicium (Si), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C). Die anderen Elemente wie Natrium (Na), Kalium (K) und Chlor (Cl) werden als Salz aus dem Untergrund angesehen (Abb. 96d). Eine eindeutige Klassifizierung wäre nur durch röntgendiffraktometrische Analyse möglich, wobei die Poren für die Präparation und Anreicherung einer ausreichend großen Menge für das Analysenverfahren zu klein waren. Dennoch bleibt zu bemerken, dass das Gefüge durch diese sekundären Kristallbildungen, seien sie auf natürliche Weise im Rahmen der Verwitterung entstanden oder Resultat einer unbekannteren Oberflächenbehandlung, verdichtet wurde.

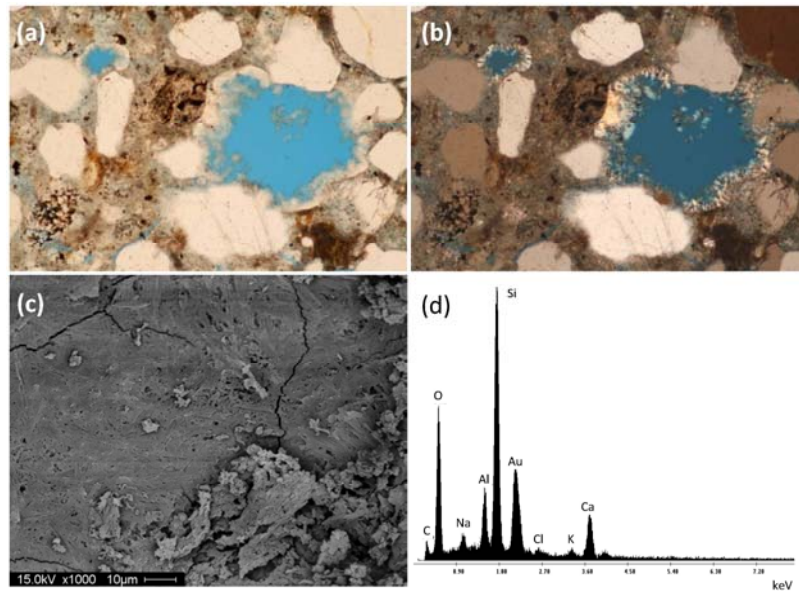


Abb. 96: Nadelige Kristalle in runden Poren des Fugenmörtels. (a) polarisationsmikroskopische Aufnahme, lange Bildkante: 1 mm, parallele Polarisatoren; (b) gleicher Ausschnitt wie a, teilgekreuzte Polarisatoren; (c) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Kristalle mit BSE-Detektor; (d) EDX-Spektrum der Kristalle.

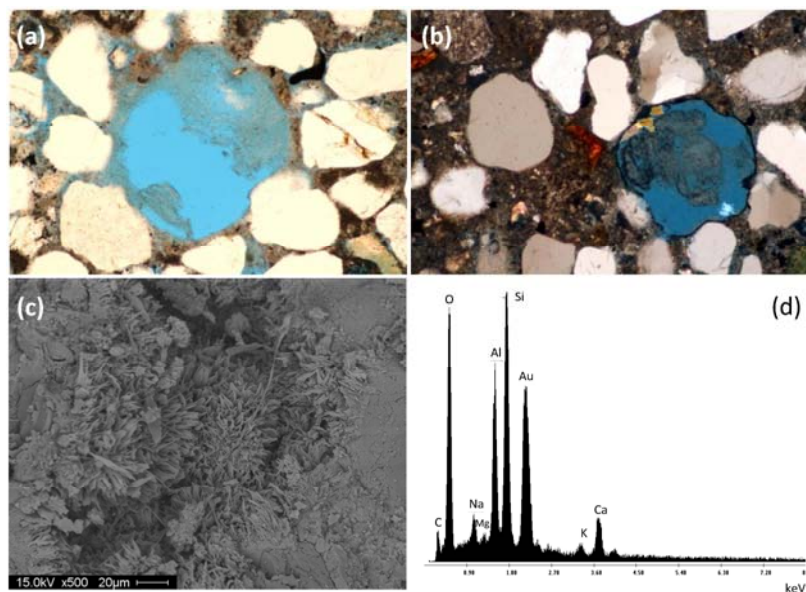


Abb. 97: Mikroskopische Untersuchungen am Mauermörtel. (a) nadeliger Kristalle im Polarisationsmikroskop, lange Bildkante: 1 mm, parallele Polarisatoren; (b) Porenfüllung im Polarisationsmikroskop, teilgekreuzten Polarisatoren, lange Bildkante: 1 mm; (c) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Kristalle mit BSE-Detektor; (d) EDX-Spektrum der Kristalle.

Im Mauermörtel wurden in den größeren runden Poren ebenfalls nadelige Kristalle identifiziert, die aber eine andere Morphologie als im Fugenmörtel aufweisen (Abb. 97a). Teilweise treten auch am Porenrand dunkelbraune feinteilige Säume auf, wie ein Beispiel in Abb. 97b bei teilgekreuzten Polarisatoren dokumentiert. In die Pore sind

vom Rand her Portlanditkristalle gewachsen. Die Pore befindet sich in einem nicht carbonatisierten, hoch zementhaltigen Bereich. Die Kristallform gibt die rasterelektromikroskopische Aufnahme in Abb. 97c wieder und die Elementzusammensetzung Abb. 97d, die der der anderen nadeligen Kristalle ähnlich ist, wobei der Aluminiumpeak größer ist. Natrium (Na) sowie Kalium (K) scheinen wiederum als Salze einzustufen zu sein, obgleich der Chlorid-Peak fast im Untergrund des Spektrums verschwindet und nicht markiert wurde. Auch hier lässt sich keine eindeutige Identifizierung durchführen, ebenso gibt die Fachliteratur darüber keine hinreichende Auskunft.

4.3.7 Instandsetzungskonzept und Durchführung der Maßnahmen

Grundsätzlich ist bei der Instandsetzung zu beachten, dass das Wasser am Eindringen in den Mauerwerksquerschnitt so weit wie möglich gehindert wird, um eine weitere Aufschaukelung der Wassergehalte durch schnelle kapillare Wasseraufnahme und langsame Trocknung mit resultierender anhaltender Hinterfeuchtung bzw. Durchfeuchtung der in das Mauerwerk einbindenden Stahlbetondecken zu verhindern. Dazu ist eine hinreichende Trocknung zu gewährleisten. Die hohe Feuchtebelastung führte auch innen zu Schäden, wie z.B. Rissbildungen in Betonunterzügen und Fensterstürzen infolge der Bewehrungskorrosion und auch der mangelhaften Austrocknungsmöglichkeit nach innen, so dass zusätzlich auch Putzschäden und Schimmelbefall damit verbunden sind. Deshalb sind sowohl Maßnahmen auf der Außenseite als auch im Innenbereich erforderlich.

Entscheidend für die Instandsetzung der Außenhülle ist die nachhaltige Schließung der Risse, wobei die Lage der großen, überwiegend vertikalen Rissbildungen anhand der weißen Calcitablagerungen bereits offensichtlich ist. Daneben ist eine Überarbeitung der Gesimsabdeckungen aus zementhaltigem Mörtel erforderlich, da dieser bereits an vielen Stellen Fugenflankenabrisse aufweist. Zudem sollten Fehlstellen im Fugenmörtel geschlossen werden.

Folgende Vorgehensweise ergab sich aus der Interpretation der Ergebnisse. Zunächst sollte das Mauerwerk mittels Wirbelstrahlverfahren mit oder ohne Zusatz von Wasser gereinigt werden, um den Bewuchs und lose Fugenmörtelanteile zu entfernen. Bevorzugt wurde letztgenannte Variante, wie in Abb. 98a in der Übersicht und in Abb. 98 im Detail dokumentiert ist.

Im Bereich der Risse wird je nach Zustand ein Austausch der Hartbrandklinker und des Mauer- und Fugenmörtels vorgenommen. Zusätzlich kann je nach Zustand in Teilbereichen auch eine zusätzliche Vernadelung der Rissflanken und ggf. Verpressung z.B. mit Epoxidharz erforderlich sein. An zwei rissbehafteten Stellen im Eckbereich sollte in Höhe der einbindenden Decken das Mauerwerk soweit geöffnet werden, um zu überprüfen, ob die Korkunterlage nur im Auflagerbereich vorhanden ist oder auch als vertikale Trennung zwischen äußerer Mauerwerksschale und der Seitenfläche der Stahlbetondecke. In Abb. 99a ist eine solche Öffnungsstelle beispielhaft dargestellt, in der keine Korktrennlage vorgefunden wurde.

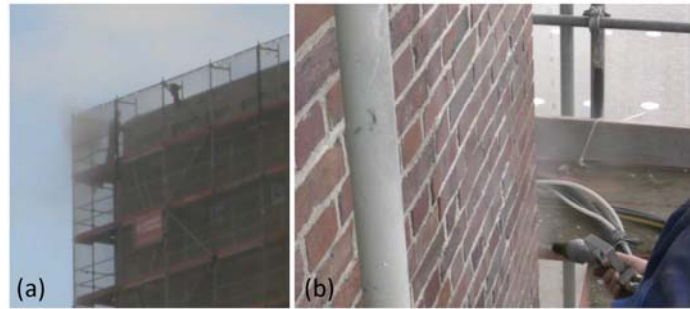


Abb. 98: Fassadenreinigung. (a) Einsatz des Wirbelstrahlverfahrens ohne Zusatz von Wasser in der Übersicht; (b) Detailaufnahme mit Düsenkopf.



Abb. 99: Arbeitsschritte bei der Instandsetzung. (a) Ausbau geschädigter Hartbrandklinker; (b) Anpassung von Farbton und Struktur des Fugenmörtels; (c) Reinigung mit Schwamm nach Steinersatz; (d) Einbringen des Fugendeckmörtels.

Vor der Applikation des Fugenmörtels sind die Fugen gründlich zu reinigen, damit sämtlicher Staub entfernt wird und später nach entsprechender Vornässung eine ausreichende Fugenflankenhaftung gewährleistet ist. Der Fugenmörtel muss einen dynamischen E-Modul bzw. eine Druckfestigkeit aufweisen, die deutlich geringer ist als die der Hartbrandklinker, damit bei der thermischen Dehnung und Kontraktion nicht erneut Fugenflankenabriss entstehen, sondern die Fugen die zyklischen Längenveränderungen der Hartbrandklinker schadlos überstehen. Außerdem sollte er eine Vergütung aufweisen, die zusätzlich an den Fugenflanken für eine Verklebung sorgt, da eine mechanische Verkrallung der zementären Bindemittelkomponente mit stark verglasten Ziegelflanken häufig nicht ausreicht. Als Fugenmörtel wurde Restauriermörtel sk (Remmers) in einer objektspezifischen Modifizierung eingesetzt. In Rücksprache mit dem Hersteller sollte das Produkt mit einem Additiv, welches die Ausblühneigung reduziert, ausgestattet werden. Schließlich erfolgte noch die Farbtonanpassung (Abb. 99b). Die weiteren Fotos

in Abb. 99 stellen ausgewählte Arbeitsschritte wie die Zwischenreinigung und Verfü- gung an verschiedenen Stellen des Wasserturms im oberen Bereich dar.

Weiterhin wurde empfohlen, die Gesimsoberseiten mit Kupferblech, welches mit einer leichten Aufkantung und Unterschnitt in die Lagerfuge über das Gesims geführt werden sollte, abzudecken, um den Wassereintritt über erneut auftretende Fugenflankenabrisse einer der Bewitterung ausgesetzten Mörtelabdeckung zu verhindern.

Eine Hydrophobierung der Außenhülle wurde nicht durchgeführt, da aufgrund der wei- terhin bestehenden klimatischen Beanspruchungen erneut Fugenflankenabrisse, eventu- ell auch wieder Risse in den Bauwerksecken in Höhe der einbindenden Decken entste- hen können. Wenn das gesamte Mauerwerk hydrophobiert ist, kann ungleich mehr ablaufendes Regenwasser in Risse eindringen als ohne Hydrophobierung, selbst bei Mauerwerk aus Hartbrandklinkern. Stattdessen sollte zukünftig ein Monitoring durchge- führt werden, mit welchem der Oberflächenzustand in Intervallen von mehreren Jahren kontrolliert wird.

Erst nach Beendigung der Außenarbeiten war es sinnvoll, mit der Instandsetzung im Turminnenen zu beginnen und zwar mit der Entfernung der Fliesenschilde an den Wän- den und der darauf folgenden Austrocknung des Mauerwerks, unterstützt durch Kon- denstrockner. Nach dem Entfernen der Fliesen konnte festgestellt werden, dass nur unter der Kassettendecke aus Stahlbeton, die den Wasserbehälter trägt, Hartbrandkлин- ker für den gesamten Mauerwerksquerschnitt verwendet wurden. In den anderen Berei- chen liegt außen lediglich die Vormauerschale in Form von Hartbrandklinkern vor. Das Mauerwerk selbst wird durch typische Hintermauerziegel aufgebaut, die sich leicht auf- grund ihres helleren Farbtons von den Hartbrandklinkern unterscheiden lassen. Der Übergang ist in der Fensterleibung des Raumes mit der Kassettendecke unter dem Was- serbehälter nach Entfernung der Wandfliesen deutlich sichtbar (Abb. 100a). Zudem konnten bei der Inspektion wenige Wochen nach dem Entfernen der Wandfliesen noch Wasseraustritte aus dem Mauerwerk festgestellt werden (Abb. 100b).

Zusätzlich sollten auch die Beschichtungen auf dem Putz des Treppenhauses und dem Stahlbetondecken und –unterzügen entfernt werden. Auf dem Beton war der freigelegte Zementmörtel auf Hohlstellen, Abplatzungen und Risse zu kontrollieren. Damit ver- bunden sollte auch eine Überprüfung der Bewehrung als Ursache für die Rissbildung durch die Korrosion des Eisens stattfinden. An den geschädigten Teilflächen sollte die Bewehrung entrostet und der Beton realkalisiert werden (Instandsetzungsprinzip R).

Im Aussichtsraum und im Bereich des oberen Umganges des Wasserbehälters sollte ein kapillaraktives wasserdampfdiffusionsoffenes Schimmelsanierputzsystem appliziert werden, während für die Innenseiten der Wände im Raum mit dem Wasserbehälter ein Kompressenputz, mit einer Porosität von >60%, auf einem Vorspritzmörtel als Haft- vermittler aufgebracht werden sollte. Der Putz ist kapillaraktiv und hat dadurch eine hohe Wasserdurchgangsrate. Gleichzeitig kompensiert der Putz auch den hohen Kon- densatanfall indem das Kondensat über ein großes Volumenelement verteilt wird. Der Aussichtsraum und der Raum mit dem Umgang um den Behälter nach Applikation des Putzsystems sind in den Abb. 100c und d zu sehen.



Abb. 100: Instandsetzung im Innenbereich. (a) Fensterleibung nach Entfernung der Wandfliesen; (b) Wasseraustritt aus der Wand noch einige Wochen nach Entfernung der Wandfliesen; (c) Aussichtsraum nach Neuverputz, (d) Umgang um den Wasserbehälter nach Neuverputz der Innenseiten der Außenwände.

In Teilbereichen des Treppenhauses hat der Gipsspachtel im Untergrund in Kombination mit Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk zu Schäden geführt. Diese Flächen waren instand zu setzen, wobei zur Glättung der Wandoberflächen kein Gipsspachtel mehr eingesetzt werden durfte.

4.3.8 Erfolgskontrolle

Nach der Mauerwerksinstandsetzung hat sich bei dem Wasserturm eine scheckige Oberfläche gebildet, die abhängig von der Wetterlage stärker oder weniger stark sichtbar war (Abb. 101a). Im Rahmen der Inneninstandsetzung wurde auf der Westseite ein Gerüststrang mit Lastenfahrstuhl aufgebaut, so dass die Mauerwerksoberfläche in Augenschein genommen werden konnte. Bei kurzem Betrachtungsabstand kann die scheckige Oberfläche auf grauweiße Ablagerungen auf den Hartbrandklinkern und Fugen zurückgeführt werden (Abb. 101b).

An dem zugänglichen Mauerabschnitt konnte auch eine Prüfung der Wasseraufnahme mittels Franke-Platte vorgenommen werden (Abb. 101c). Das Wasser breitet sich teilweise entlang der Flanken der Lagerfugen auch lateral aus, wie Abb. 101d bestätigt. Die Wasseraufnahme ist deutlich größer als die des Bestandsmauerwerks, liegt aber immer noch im Bereich für schlagregensicheres Mauerwerk, wenn man die Grenzwerte von Franke als Beurteilungsgrundlage benutzt (Abb. 101e).

Bei dem Belag handelt es sich nach Vortests mit verdünnter Salzsäure vor Ort um Calcit, der in unterschiedlicher Kristallgröße mehr oder weniger zusammenhängende Beläge

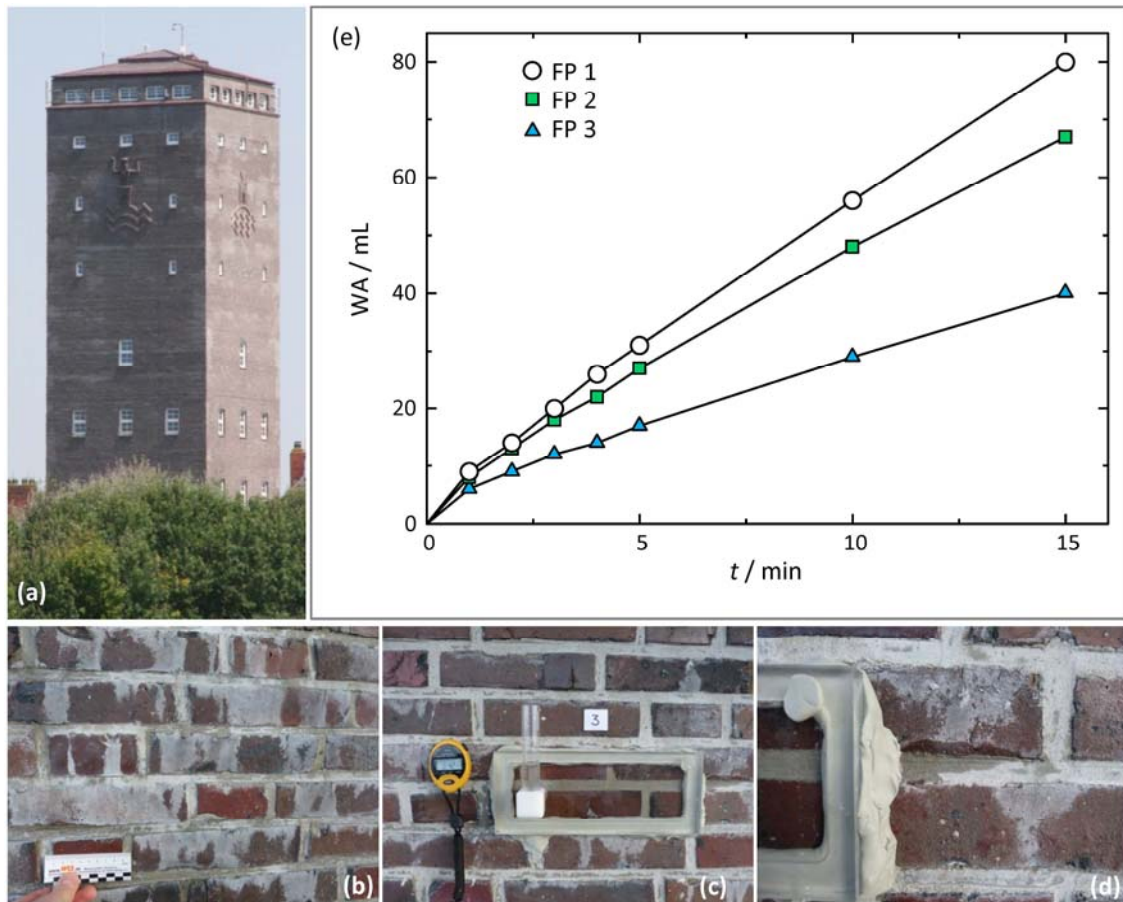


Abb. 101: Mauerwerk nach Instandsetzung. (a) Turmansicht von der Jann-Berghaus-Straße; (b) grauweiße Ablagerungen auf den Ziegeln; (c) Prüfung der Wasseraufnahme mittels Franke-Platte (Messung 3); (d) Ausbreitung des Wassers entlang der Fugenflanke (Detail aus c); (e) Ergebnisse der Wasseraufnahmemessungen.

auf den Hartbrandklinkeroberflächen bildet, wie die mit dem mobilen Digitalmikroskop angefertigten Abbildungen belegen (Abb. 102a und b). Die Ablagerungen entlang einer Fuge und angrenzend zu den Rissflanken in einem Hartbrandklinker sind in Abb. 102c und d zu sehen. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Abb. 102e) und die Röntgenmikrobereichsanalyse (Abb. 102f) bestätigen aufgrund der hellgrauen Farbe und der Elementzusammensetzung, dass es sich dabei um Calcit handelt. Andere Elemente als Ca, C und O repräsentieren lediglich den Untergrund unter dem Calcitbelag. Neben Calcit finden sich auf den Klinkeroberflächen auch Halitkristalle, die schon aufgrund ihrer typischen kubischen Kristallform identifiziert werden können.

Die Untersuchung ergab, dass vor allem entlang der unteren Lagerfugen an Calciumhydroxid gesättigtes Wasser nach außen gelangte und über die Klinkeroberfläche abließ bzw. aufdornet und durch CO_2 -Zutritt aus der Luft carbonatisierte und aufgrund der viel schlechteren Löslichkeit von Calcit auskristallisiert ist. Da die Instandsetzung der Außenhülle als erste Maßnahme erfolgen musste und das Mauerwerk nicht ausreichend lange austrocknen konnte, war das Potenzial zur Bildung dieser gesättigten Lösungen noch in ausreichendem Maß vorhanden. Die Trocknung musste zunächst nahezu voll-

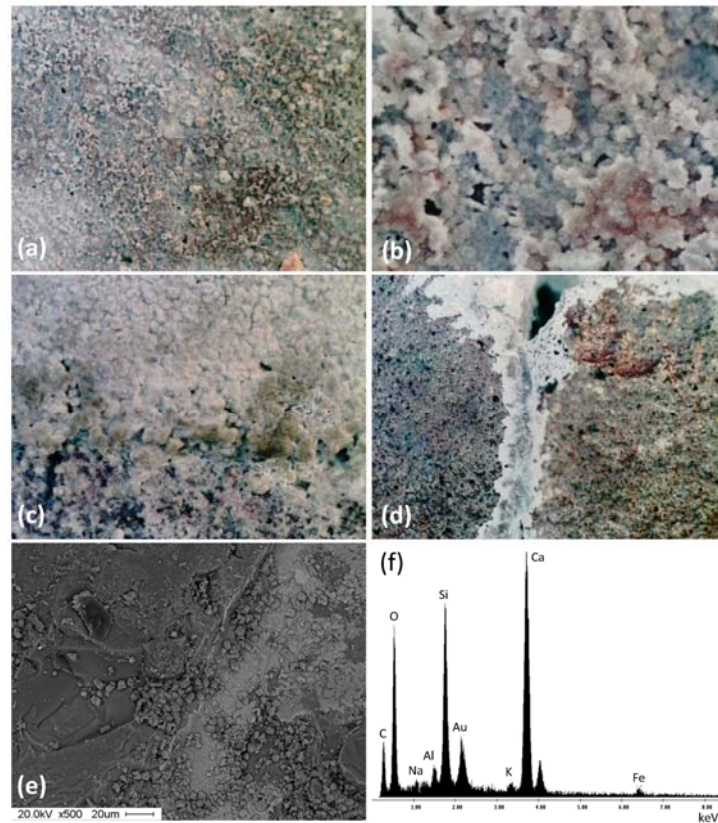


Abb. 102: Mikroskopie der grauweißen Beläge auf dem Mauerwerk. (a) Kristalle auf dem Hartbrandklinker; (b) größere Kristalle auf Klinkeroberfläche; (c) Calcitbelag auf Grenzfläche Hartbrandklinker–Fugenmörtel; (d) Calcitablagerung entlang eines Risses im Hartbrandklinker; (e) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme mit BSE-Detektor; (f) EDX-Spektrum der grauweißen Beläge, Hauptelemente: Calcium (Ca), Sauerstoff (O) und Kohlenstoff (C). (a-d): mobiles Digitalmikroskop, lange Bildkante: 8 mm.

ständig über die Außenhaut erfolgen, wodurch sich letztlich die somit unvermeidbaren Ablagerungen bilden konnten.

5 Schlussfolgerungen und Bewertung

Mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wurde unter Zuhilfenahme weiterer vorliegender Daten aus früheren Untersuchungen [38,39] ein integrales Untersuchungskonzept erarbeitet. Um eine nachhaltige und denkmalgerechte Instandsetzung beider Bauwerke, die Gegenstand dieses Vorhabens waren, der Grundschule und dem Wasserturm in Norderney, durchzuführen zu können, war das Untersuchungskonzept jeweils objektspezifisch zu modifizieren. Beide Bauwerke können als repräsentativ für Objekte betrachtet werden, die aufgrund ihrer Küsten- bzw. Insellage extremen klimatischen Belastungen ausgesetzt sind. Seit die Schwefeldioxid-Belastung der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten erfreulicherweise sehr stark reduziert werden konnte, ist die Anreicherung von Sulfaten im Mauerwerk historischer Gebäude wohl nicht mehr als Hauptsalzquelle zu betrachten. Im Küstenraum stellt heute der Eintrag von Seesalz, insbesondere also von Natriumchlorid, vermutlich die wichtigste Salzquelle dar, jedenfalls bei Abwesenheit von Salzeintrag durch aufsteigende Feuchtigkeit. Der an den Küsten herrschende hohe Winddruck forciert weiter den Wassereintrag in ein Mauerwerk und führt in Verbindung mit den hohen Salzgehalten der Luft und des Niederschlags zu extremen Klimabedingungen, denen Bauwerke an der Küste ausgesetzt sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass praktikable Lösungen, die für solche Denkmäler gefunden werden, auch auf andere Gebäude übertragbar sein sollten, die weniger aggressiven Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Eine stellt hier sicherlich die besondere Situation einer hohen Belastung durch aufsteigende Grundfeuchte oder gar drückendes Grundwasser dar, welche nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens waren.

Diese Übertragbarkeit betrifft auch die Fragestellung, ob eine kapillarleitende Innendämmung am Bauwerk überhaupt möglich ist oder unter welchen Bedingungen diese eingebaut werden kann. Die ursprüngliche Vorstellung zur Bearbeitung dieser Fragestellung bestand darin, analog zu Denkmälern aus Naturwerkstein aus vor Ort ermittelten Wasseraufnahmen mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten, z.B. über einen Zeitraum von einer halben Stunde, einen Wasseraufnahmekoeffizienten zu berechnen, um diesen mit Konservierungsversuchen an Bohrkernen im Labor vergleichen zu können. Diese Vorstellung musste allerdings verworfen werden. Aufgrund des hohen Fugenteils von Ziegelmauerwerk, der im Gegensatz zu Naturwerksteinbauwerken bis zu 20% der exponierten Wandoberfläche ausmachen kann, muss für den Wassertransport, d.h. das Wasseraufnahmeverhalten vor allem der Mauerwerksverbund aus Ziegeln und Fugen betrachtet werden. Dadurch ergeben sich im Vergleich zu beispielsweise einem geschichteten Sandstein noch weitaus inhomogenere Verhältnisse.

Für die vor Anbringung einer Innendämmung erforderlichen Feuchteschutzbeurteilung werden üblicherweise Computerprogramme zur Simulation des Feuchtetransportverhaltens eines Mauerwerks eingesetzt. Solche Programme basieren auf festgelegten Randbedingungen, beispielsweise Vorgaben der klimatischen Verhältnisse, evtl. eine begleitende Hydrophobierung der Außenhülle und natürlich den feuchtechnischen Kenndaten der verwendeten Ziegel und Mörtel. Diese werden üblicherweise in Laborversuchen ermittelt. Selbst wenn bei solchen Versuchen von Verbundprüfkörpern aus-

gegangen wird und nicht nur von den Kenndaten der reinen Materialien, so entsprechen die ermittelten Kenndaten häufig nicht den Gegebenheiten am Objekt, weil die Verbundprüfkörper unter idealen Bedingungen im Labor hergestellt wurden. Das haben auch die Untersuchungen in diesem Vorhaben bestätigt. Darüber hinaus weichen reale Ziegelmauerwerke in ihrem Aufbau und der Verteilung des Mörtels, möglicherweise auch unterschiedlicher Mörtel, sehr stark vom idealisierten, durch das Format und den Ziegelverband vorgegebenen Zustand ab. Deshalb müssen Untersuchungen an Denkmälern aus Ziegelmauerwerk aus einer sinnvollen Kombination aus Untersuchungen vor Ort und aus Laboruntersuchungen bestehen.

Für die zerstörungsfreie Prüfung der Wasseraufnahme von Verbundmauerwerk wurde im Rahmen dieses Vorhabens wieder auf die anfänglich von Franke und Bentrup [6] verwendete runde Form der später entwickelten rechteckigen Franke-Platte zurückgegriffen. Dies geschah zunächst in der Absicht, aus an Ziegeln mit einem modifizierten Wassereindringprüfer nach Karsten gewonnenen Messwerten und daraus berechneten w -Werten, die Wasseraufnahme des Ziegels für den Verbund zu subtrahieren, um letztlich die Wasseraufnahme allein für den Mörtel, kombiniert aus der Wasseraufnahme über die Poren und entlang der Fugenmörtelgrenzfläche zu erhalten. Aufgrund des sehr unregelmäßigen Aufbaus, teilweise an der Oberfläche nicht sichtbarer fehlender Kontakte zwischen Fugen-/Mauermörtel und Ziegel und des enormen Einflusses der lateralen Transportkomponente musste davon Abstand genommen werden.

Der Vorteil der runden Messkammer mit einem Durchmesser von 10 cm bleibt dennoch evident. Durch die ziegelformatunabhängige Größe lassen sich Messungen in Ziegelverbänden mit unterschiedlichem Format jeweils am Kontakt zwischen einer Stoßfuge und einer Lagerfuge durchführen. Diese Punkte stellen hinsichtlich der Wasseraufnahme besonders kritische Punkte im Mauerwerk, bei augenscheinlich intaktem Verbund, d.h. ohne sichtbare Fugenflankenabriss, dar. Ein weiterer praktischer Vorteil liegt darin, dass immer Positionen wählbar sind, bei denen die Stoßfuge von oben auf der Lagerfuge trifft, während bei der Franke-Platte eine Stoßfuge von der in der Messkammer mittig angeordneten Lagerfuge immer auch nach unten geht. Dies hat sich als unzuverlässig für Messungen in der Übergangsjahreszeit erwiesen, da trotz intensiver Abdichtung der Platte mit dem dafür vorgesehenen Kitt ein Drittel bis die Hälfte der Messungen wegen nach unten auslaufenden Wassers wiederholt werden musste. Gerade im durch den Tourismus geprägten norddeutschen Küstenbereich dürfen aber die meisten Maßnahmen an Objekten nur in den Übergangsjahreszeiten, einschließlich frostfreier Wintertage durchgeführt werden. Das betrifft auch die meisten Lärm verursachenden Bauwerksuntersuchungen. Zwar zählt die Wasseraufnahme nicht dazu, wird aber in der Regel mit anderen Verfahren kombiniert, deren Durchführung in den Sommermonaten als kritisch anzusehen ist. Darüber hinaus ist eine runde Form von Vorteil, wenn das Verfahren mit der entwickelten in situ Trocknungsmessung kombiniert wird. Bei der Trocknungsmessung muss für eine ausreichende Verwirbelung der durchgesaugten trockenen Luft bzw. Umgebungsluft gesorgt werden, um undefinierte Einflüsse von Transportprozessen in Gasphase auszuschließen. Dies wird zuverlässig durch Einbau eines Ventilators in einer runden Kammer gewährleistet.

Durch die Verwendung einer Doppel-Bürette kann der Wasserstand im Einfüllrohr konstant gehalten werden, um die für die Nordseeküste zu berücksichtigende Wirkung des Winddruckes bei dem Wassereintrag über Durchströmungsporen in das Mauerwerk zu berücksichtigen. Auf Basis von kombinierten Objekt- und Laboruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Wasseraufnahme der Ziegel unabhängig von der Füllhöhe (5 bzw. 10 cm) aufgrund der Kapillarporen abläuft. Bei den Verbundprüfkörpern für die Laborversuche, die unter optimalen Bedingungen hergestellt wurden, erfolgte die Wasseraufnahme nur in geringem Maß abhängig von der Füllhöhe des Messrohres, während am Bauwerk die Wasseraufnahme des Verbundes als weitgehend druckabhängig angesehen werden muss.

Die Messung der Trocknung am Bauwerk erwies sich als ungleich schwieriger, einerseits abhängig von dem erforderlichen Messverfahren und andererseits von den herrschenden Randbedingungen. Prinzipiell hat sich das Messverfahren jedoch bewährt und bietet somit die Möglichkeit, das Trocknungsverhalten von Mauerwerk in situ, d.h. am Objekt messtechnisch zu untersuchen. Im Vergleich zur Messung der kapillaren Wasseraufnahme ist der Messaufwand aber ungleich größer, so dass die Durchführung einer großen Zahl von Messungen, wie es bei der Verwendung von Karsten-Röhrchen oder Franke-Platte durchaus üblich und sinnvoll ist, im Falle der Trocknungsmessung nicht praktikabel erscheint. Sofern es die Fragestellung aber erfordert, z.B. falls eine Innendämmung vorgesehen ist, sind gezielte Trocknungsmessungen sehr sinnvoll.

Ein weiteres Problem bei der Durchführung von Trocknungsmessungen ist die derzeit noch nicht vorhandene Vergleichsdatenbasis von Messungen unter unterschiedlichen Messbedingungen und auf unterschiedlichen Materialien. Hier wären idealerweise Vergleichsmessungen im Labor wünschenswert, die mit Messdaten vom Objekt abgeglichen werden können. Unter Berücksichtigung der bereits erwähnten Probleme mit der Vergleichbarkeit von Verbundprüfkörpern, die unter Laborbedingungen hergestellt wurden, mit der tatsächlichen Situation am Objekt, scheint es angeraten, solche Vergleichsmessungen nicht am Verbundmauerwerk sondern mit einem definierten Material, z.B. an einem Sandsteinobjekt durchzuführen. Im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens konnten solche Untersuchungen allerdings nicht mehr durchgeführt werden.

Schließlich sei auf weitere Anwendungsmöglichkeiten der hier entwickelten Messkammer verwiesen. Gute Möglichkeiten für einen sinnvollen Einsatz der Messkammer ergeben sich auf versalztem Mauerwerk, wenn die Wechselwirkung zwischen dem Salzgemisch im Mauerwerk und dem Umgebungsklima von Bedeutung ist. Diese Fragestellung tritt sehr häufig auf, wenn in Innenräumen mit versalztem Mauerwerk die Auswirkungen von Nutzungs- und damit verbundenen Klimaänderungen hinterfragt werden. Derzeit wird beispielsweise die Möglichkeit zur Bestimmung kritischer Luftfeuchtigkeiten (Deliquescenzfeuchtigkeiten) von reinen Salzen und Salzgemischen in Baustoffen im Rahmen einer Masterarbeit untersucht.

Die zerstörungsfreien Messungen der Wasseraufnahme und -abgabe wurden kombiniert mit der minimalinvasiven Bohrwiderstandsmessung mit dem Gerät DMR von SINT Technology mit dem eine ausreichende Anzahl von Bohrungen pro Zeiteinheit durchgeführt werden kann und welches in der praktischen Handhabung am Objekt vergleichs-

weise einfach ist. Damit ließen sich folgende wichtige Untersuchungen von Verbundmauerwerk vor Ort durchführen:

- Erfassung der Übergänge/Grenzen zwischen Fugen- und Mauermörtel in der Tiefe
- Feststellung von Lockerzonen unter dem Putz auf Ziegelmauerwerk (Innenbereich)
- Abgrenzung von gelöster und fest anhaftender Brennhaut
- Vergleichende Untersuchung der Festigkeiten (rückgewitterte Ziegel/intakte Ziegel, Ziegel/Mörtel)
- Erfolgskontrolle durchgeführter Maßnahmen (Bauabschnitt 1, Musterflächen)

Diese Bohrwiderstandsmessung stellt deshalb einen wesentlichen Bestandteil der integralen Objektuntersuchung dar und ist sehr hilfreich bei der Interpretation von Wasseraufnahme- und Wasserabgabemessungen.

Weiterhin wurden die genannten zerstörungsfreien bzw. minimalinvasiven Untersuchungsmethoden mit der Polarisationsmikroskopie petrografischer Dünnschliffen ausgewählter Sandwichbohrkerne kombiniert. Diese Bohrkerne wurden über eine Lagerfuge trocken gebohrt und geben damit nicht nur über die Zusammensetzung der verwendeten Baustoffe und deren Einzelgefüge Auskunft, sondern erlauben vor allem auch detaillierte Aussagen über das Gefüge an Grenzflächen (zweidimensional bei einem Schnitt senkrecht zur Oberfläche). Daraus ließen sich durch Gips verdichtete Zonen erkennen und deren Einfluss auf die Wasseraufnahme interpretieren, aber die Detektion von Rissen bzw. Flankenabrissen oder die Untersuchung von Verteilung und Anbinde verschiedener Mörtelschichten wird auf diese Weise ermöglicht.

Die prinzipielle Vorgehensweise erweist sich als in höchstem Maße denkmalgerecht, da der Fokus hauptsächlich auf zerstörungsfreien Messungen liegt, gefolgt von den Bohrwiderstandsmessungen, die nur minimale Schäden verursachen. Demgegenüber können zerstörende Bohrkernentnahmen (mindestens 4 cm Durchmesser) auf Basis der vorangehenden Untersuchungen auf ein Minimum begrenzt werden. Zudem beruhen sämtliche Aussagen auf objektspezifischen Ergebnissen.

Ergänzt wurden diese Untersuchungen noch durch tiefenabhängige Salzanalysen, wobei hier das Probenahmekonzept aus [38] aufgegriffen wurde, indem Bohrungen in den Fugen die tiefenabhängige Salzverteilung über den Mauerquerschnitt repräsentieren und Feinprofile die im Ziegel. Erstgenannte lassen beispielsweise keine Aussage darüber zu, ob z.B. eine hydrophobierende Imprägnierung auf das Mauerwerk aufgebracht werden darf. Einerseits ist der Abstand der einzelnen Tiefensegmente zu groß, um die tatsächliche Salzbelastung in der Oberflächenzone differenziert zu erfassen, andererseits wird den Ziegeln eine höhere Wertigkeit im Hinblick auf ihre Erhaltung zugewiesen, während Fugenmörtel eher ersetzt werden. Durch eine Feinauflösung des Salztiefenprofils in einem Ziegel im vorderen Bereich zwischen 0,5 mm und 1 mm lässt sich feststellen, ob dort eine Salzanreicherung vorliegt, die den Einsatz einer Hydrophobierung, auch einer adaptiven, zwingend verbietet. Salztiefenprofile sollten aus mindestens vier Segmenten bestehen, wovon drei dazu dienen den Trend festzulegen, ob der Salzgehalt zum

Ziegelkern weiter zu- oder abnimmt. Das vierte Segment, in diesem Fall das vordere und zugleich jenes mit der geringsten Stärke, lässt darauf schließen, ob im unmittelbaren Oberflächenbereich eine hohe Salzanreicherung in dem Gefüge stattfand. Da die Hartbrandklinker des Wasserturms über die Oberfläche kein Wasser aufnehmen, war eine Prüfung der Salzbelastung nicht erforderlich. Für die Grundschule kann aufgrund der vorgefundenen tiefenabhängigen Salzbelastung eindeutig die Aussage abgeleitet werden, dass keine Hydrophobierung eingesetzt werden darf.

Grundsätzlich kann nicht genügend betont werden, dass es erforderlich ist, an der Oberfläche die Proben mit sehr hoher Auflösung zu entnehmen. Sind hier die Probenstärken zu groß, dann ist es nicht möglich, hohe Anreicherungen zu detektieren. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Messungen an Bohrkernen mit anschließender Gewinnung hochaufgelöster Proben mittels Fräsprobenahme haben sich hier bewährt und belegen eindeutig, dass es in der Nähe der Gesteinsoberfläche sehr starke Gradienten gibt, so dass das bei der Salzmessung erzielte Ergebnis immer von der Probenstärke abhängig ist.

Generell kann die Salzbelastung eines Objektes nicht zerstörungsfrei ermittelt werden, es ist vielmehr immer ein Minimum an zerstörenden Eingriffen durch Probenentnahmen erforderlich. Dennoch sind entsprechende Untersuchungen unverzichtbar, um den Zustand eines Bauwerkes zuverlässig bewerten zu können. Vor diesem Hintergrund scheint es aus denkmalpflegerischer Sicht kaum vertretbar zu sein, wenn aus solchen Proben nicht versucht wird, ein Maximum an Information zu extrahieren. Insbesondere ist es vollkommen unverständlich, wenn auf eine Analyse der Kationen verzichtet wird, denn dadurch steigen die Kosten einer Analyse nur unerheblich (der Aufwand der Probenentnahme und Probenvorbereitung ist unverändert), hingegen ist die Information über die Kationen für eine Interpretation des Verhaltens und des Schadenspotentials eines Salzgemisches unverzichtbar und sind Voraussetzung für weitergehende Auswertung unter Verwendung von Programmen wie ECOS–Runsalt.

Die Tiefenbohrungen für die Salzprobenahme in der Grundschule haben weiterhin gezeigt, dass eine Luftschicht im Mauerwerk nicht überall dort vorhanden war, wo sie nach dem Gebäudeschnitt aus den ursprünglichen Planunterlagen hätte vorhanden sein sollen. Im Hinblick auf den umfassenden Einbau einer kapillarleitenden Innendämmung, die in einem Raum auf der Nordostecke seit längerem eingebaut ist, lässt sich grundsätzlich die Aussage treffen, dass eine Luftschicht, sofern vorhanden, grundsätzlich die Funktionsfähigkeit begünstigt. Vor der Ausstattung weiterer Räume mit einer solchen Innendämmung muss bekannt sein, wo sich tatsächlich eine Luftschicht befindet und wo nicht.

Durch den integralen Untersuchungsansatz, in welchem die Prüfung der Wasseraufnahme eine wesentliche Rolle spielt und zukünftig die Trocknungsmessung auch in begrenztem Umfang aufgrund des hohen Messaufwandes eine Rolle spielen kann, lassen sich grundlegende objektspezifische Aussagen zum Einbau von kapillarleitenden Innendämmungen treffen. Vorangestellt werden muss die Instandsetzung der Außenhülle, also des Ziegelmauerwerks. In dem Fall der Grundschule muss damit die Instandsetzung der Konstruktion, wie sie beschrieben wurde, einhergehen. Der auf der Ostseite

dokumentierte Zustand, als der am besten erhaltene, muss auch für die anderen Seiten angestrebt werden. Durch die die Maßnahmen begleitenden Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Situation sich noch komplexer darstellt, als aus den nur punktuell durchführbaren Zustandsanalysen zu schließen war. Deshalb ist zunächst die Instandsetzung der Außenhülle und auch die der Konstruktion abzuschließen und eine Erfolgskontrolle nach dem vorgestellten integralen Untersuchungskonzept durchzuführen. Sukzessive könnte in den am wenigsten klimatisch beanspruchten Bauteilen, in diesem Fall in den Räumen der Ostseite, mit dem Einbau einer kapillarleitenden Innendämmung begonnen werden, ohne dass auf der Außenseite zusätzlich eine Hydrophobierung aufgebracht wird. Später könnten ggf. Räume auf der Westseite folgen, sofern nach Instandsetzung der Außenhülle tatsächlich ein Zustand wie auf der Ostseite erreicht wird. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die handwerkliche Ausführung. Oft können die hohen Anforderungen, um bestimmte technische Zielvorgaben für die Instandsetzung und den Einbau einer Innendämmung zu erreichen, nicht erfüllt werden. Gegebenenfalls ist im Hinblick auf den Schutz der erhaltenswerten Bausubstanz sogar auf den Einbau einer Innendämmung zu verzichten.

Das erarbeitete integrale Untersuchungskonzept lässt auch ohne die Möglichkeit der Berechnung von w -Werten aus Wasseraufnahmemessungen eine Entscheidungsfindung zu, ob eine kapillarleitende Innendämmung eingebaut werden kann und ob eine Hydrophobierung der Außenhülle sinnvoll und möglich ist. Außerdem lässt sich durch diese Herangehensweise sicherstellen, dass keine Originalsubstanz nach der Maßnahme Schaden nimmt. Damit kann dieses Konzept auf andere denkmalgeschützte Bauwerke übertragen werden. Wichtig wäre hier zukünftig eine Veröffentlichung der Daten, um aufgrund eines ausreichend großen Datenpools den bisher notwendigen Untersuchungsumfang zu reduzieren. Hier bleibt insbesondere abzuwarten, inwiefern die Interpretierbarkeit der Trocknungsmessungen noch deutlich verbessert werden kann, wenn die hier entwickelte Methode erst einmal breit eingesetzt wurde und eine ausreichend große Vergleichsdatenbasis vorliegt.

6 Literaturverzeichnis

- [1] DELPHIN, Hygrothermische Bauteilsimulationssoftware, www.bauklimatik-dresden.de/delphin/
- [2] WUFI, Wärme und Feuchte Instationär, www.wufi.de
- [3] Karsten R.: Zur Frage einer Prüfung von Mörtel auf Wasserdichtigkeit. *Das Bau-gewerbe* **1963**, 43, 885–886.
- [4] Karsten R. *Bauchemie für Studium und Praxis*. Müller, Heidelberg, 10. Aufl. **2002**.
- [5] RILEM Commission 25-PEM. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Mater. Struct.* **1980**, 13, 175–253.
- [6] Franke L., Bentrup H. *Langzeitverhalten hydrophobierter Mauerwerksfassaden*. Abschlussbericht zur Forschungsarbeit. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bi 5-800189-3, **1990**.
- [7] Hill A.C. A Special Purpose Plant Environmental Chamber for Air Pollution Studies. *J. Air Poll. Contr. Assoc.* **1967**, 17, 743–756.
- [8] Willers U., Behlen A., Wiese U., Wittenburg C., Dannecker W., Steiger M. *Untersuchungen zum Einfluss von Luftschadstoffen auf die Verwitterung historischer Bausubstanz unter besonderer Berücksichtigung der trockenen und nassen Deposition atmosphärischer Schwefel- und Stickstoffspezies*. Abschlussbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung, BAU 7015X, BAU 7015Y, **2003**.
- [9] Hill A.C. A special purpose plant environment chamber for air pollution studies. *J. Air Pollut. Control Ass.* **1967**, 17, 743–748.
- [10] Wiese U., Behlen A., Steiger M. The influence of relative humidity on the SO₂ deposition velocity to building stones: a chamber study at very low SO₂ concentrations. *Environ. Earth Sci.* **2013**, 69, 1125–1134.
- [11] DIN EN 772-11 (Ausgabe 07/2011). *Prüfverfahren für Mauersteine, Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Naturwerksteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln*. Beuth-Verlag, **2011**, 8 S.
- [12] DIN EN 1015-18 (Ausgabe 03/2003). *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel)*. Beuth-Verlag, **2003**, 9 S.
- [13] DIN EN ISO 15148 (Ausgabe 03/2003). *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*. Beuth-Verlag, **2003**, 16 S.
- [14] Snethlage R. Messungen zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen an Sandsteingebäuden. Sonderheft Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege, 1. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie „Erhaltung von Naturstein“, *Bautenschutz Bausanierung* **1986**, 16–19.

- [15] Wendler E., Snethlage R. Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte. *Bautenschutz Bausanierung* **1989**, 12 (6), 110–115
- [16] Hendrickx R. Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Mater. Struct.* **2012**, 46, 1309–1320.
- [17] Karsten R. Schlagregendichte Klinkerfassaden. *Das Baugewerbe* **1963**, 43, 1192.4–1192.7.
- [18] Brüning H. Ist das Eindringen von Niederschlagswasser in Verblendmauerwerk messbar? *Ziegelind. Int.* **1989**, 42, 504–509.
- [19] Brüning H. Wassereindringen in Verblendmauerwerk. *Deutsche Bauzeitung* **1989**, 11, 80–82.
- [20] Knöfel D., Henkel S., Aschhoff A. Ist die Messung der Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfrohr zuverlässig? *Bautenschutz Bausanierung* 1995, 18 (6), 36–41.
- [21] Neumann H.-H. Möglichkeiten und Grenzen der Messtechnik im Rahmen der Bauzustandsanalyse. In: *Messtechnik – Der Weisheit letzter Schluss? Tagungsband zum 4. Sachverständigentag der WTA-D im November 2011 in Weimar*. (Hrsg.: Geburtig G., Gänssmantel J.), Fraunhofer IRB-Verlag **2012**, 61–82.
- [22] Neumann H.-H. Hydrophobierung: „Fluch oder Segen“. Eine kritische Auseinandersetzung. In: *Backstein Baukunst. Zur Denkmalkultur des Ostseeraums, Bd. III*, Monumente Publikationen **2012**, 212–221.
- [23] Franke L., Bentrup H. Einfluss von Rissen auf die Schlagregensicherheit von hydrophobiertem Mauerwerk und Prüfung der Hydrophobierbarkeit. Teil 1. *Bautenschutz Bausanierung* **1991**, 14, 98–110.
- [24] Franke L., Bentrup H. Einfluss von Rissen auf die Schlagregensicherheit von hydrophobiertem Mauerwerk und Prüfung der Hydrophobierbarkeit. Teil 1. *Bautenschutz Bausanierung* **1991**, 14, 117–121.
- [25] Franke L. Zustandsbeurteilung und Instandsetzung von Sichtmauerwerksbauten. *Mauerwerk-Kalender* **1995**, 20, 661–685.
- [26] TuTech Innovation GmbH. *Die WA-Prüfplatte nach Franke zur Beurteilung der Wasseraufnahme von Fassaden* (Hrsg.: Schmidt-Döhl F.), 6S.
- [27] Pleyers G. *Verfahren und Vorrichtung zur Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme*. German Patent No. 197 48 777.7 (04. Nov. 1997), **1997**.
- [28] Pleyers G. Zerstörungsfreie Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme von Baustoffen – das Prüfröhrchen nach Pleyers. In: *Materials Science and Restoration, MSR – V. Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Berichte zum fünften internationalen Kolloquium*. (Hrsg. Wittmann F.H., Gerdes A.), Aedificatio Verlag, Freiburg, **1999**, 471–484.

- [29] Twelmeier, H. (2012): In-situ-Messung der Wasseraufnahme an Mauerwerksfassaden. In: *Messtechnik – Der Weisheit letzter Schluss? Tagungsband zum 4. Sachverständigentag der WTA-D im November 2011 in Weimar*. (Hrsg.: Geburtig G., Gänssmantel J.), Fraunhofer IRB-Verlag **2012**, 41–60.
- [30] Wagner W., Pruss A. International equations for the saturation properties of ordinary water substance. Revised according to the international temperature scale of 1990. *J. Phys. Chem. Ref. Data* **1993**, 22, 783–787.
- [31] DIN EN ISO 12572 (Ausgabe 09/2001): *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit*. Beuth-Verlag, **2001**, 18 S.
- [32] Knöfel D., Schubert P. *Handbuch Mörtel- und Steinergänzungstoffe in der Denkmalpflege*. Verlag Ernst & Sohn, **1993**, 225 S.
- [33] Tiano P., Filareto C., Ponticelli S., Ferrari M., Valentini E. Drilling force measurement system, a new standardisable methodology to determine the “superficial hardness” of monument stones: prototype design and validation. *Int. J. Rest. Build. Monum.* **2000**, 6, 115–132.
- [34] Tiano P., Delgado Rodrigues J., De Witte E., Vergès-Belmin V., Massey S., Sneath R., Costa D., Cadot-Leroux L., Garrod E., Singer B. The conservation of monuments: A new method to evaluate consolidating treatments. *Int. J. Rest. Build. Monum.* **2000**, 6, 133–150.
- [35] Delgado Rodrigues J., Costa D. A new method for data correction in drill resistance tests for the effect of drill bit wear. *Int. J. Rest. Build. Monum.* **2004**, 10, 1–18.
- [36] Mimoso J.M., Rodrigues Costa D. A new DRMS drilling technique for the laboratory. In: *art’05 - 8th International Conference on Non-destructive Investigations and Micronalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*. Lecce, Italy **2005**.
- [37] Pamplona M., Kocher M., Sneath R., Aires Barros L. Drilling resistance: overview and outlook. *Z. dt. Ges. Geowiss.* **2007**, 158, 665–676.
- [38] Neumann H.-H. *Diagnosebericht 037-08 Grundschule Norderney*. Unveröffentlichter Bericht, Remmers-Fachplanung, Lönigen **2009**.
- [39] Neumann H.-H. *Diagnosebericht 040-08 Wasserturm Norderney*. Unveröffentlichter Bericht, Remmers-Fachplanung, Lönigen **2009**.
- [40] Steiger M., Sawdy A. Modelling the crystallisation behaviour of mixed salt systems: Input data requirements. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. Columbia University, New York, **2012**.
- [41] Arnold, A. and Zehnder, K. Monitoring wall paintings affected by soluble salts. In *The conservation of wall paintings* (Cather S., ed.), The Courtauld Institute of Art and The Getty Conservation Institute, **1991**, 103–135.

- [42] Behlen A., Steiger M., Dannecker W. Deposition of sulfur dioxide to building stones: the influence of the ambient concentration on the deposition velocity. *Environ. Geol.* **2008**, *56*, 595–603.
- [43] Steiger M. Salts and Crusts. In: Brimblecombe P. (Hrsg.): *Air Pollution Reviews – Vol. 2: The Effects of Air Pollution on the Built Environment*. Imperial College Press, London, **2003**, 133–181.
- [44] Steiger M., Charola A.E., Sterflinger K. Weathering and deterioration. In: S. Siegesmund, R. Snethlage (Hrsg.) *Stone in architecture*. Springer-Verlag, Berlin, 2. Aufl. **2014**, S. 227–316.
- [45] Clegg S.L., Whitfield M. Activity coefficients in natural waters. In: *Activity coefficients in electrolyte solutions*. (Hrsg.: Pitzer K.S.), CRC Press, Boca Raton, **1991**, S. 279–434.
- [46] Steiger M. Crystal Growth in porous materials. I: The crystallization pressure of large crystals. *J. Cryst. Growth* **2005**, *282*, 455–469.
- [47] Steiger M. Mechanismus der Schädigung durch Salzkristallisation. In: *Salzschäden an Kulturgütern – Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Ergebnisse des DBU-Workshops 2008*. (Hrsg.: Schwarz H.-J. Steiger M.), RiCon, Hannover, **2009**, 65–79.
- [48] Price C.A., Brimblecombe P. Preventing salt damage in porous materials. *Stud. Conserv.* **1994**, *39* (Suppl. 2), 90–93.
- [49] Steiger M., Zeunert A. Crystallization properties of salt mixtures: comparison of experimental results and model calculations. In: *8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* (Hrsg.: Riederer J.), Möller Druck und Verlag, Berlin, **1996**, S. 535–544.
- [50] Price C.A. *An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials*. European Commission Research Report No 11, European Communities, Archetype Publications Ltd., London, **2000**.
- [51] Steiger M. Modellierung von Phasengleichgewichten. In: *Salzschäden an Kulturgütern – Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Ergebnisse des DBU-Workshops 2008* (Hrsg.: Schwarz H.-J., Steiger M.). RiCon, Hannover, **2009**, 80–99.
- [52] Steiger M., Linnow K., Ehrhardt D., Rohde M. Decomposition reactions of magnesium sulfate hydrates and phase equilibria in the $\text{MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ systems with implications for Mars. *Geochim. Cosmochim. Acta* **2011**, *75*, 3600–3626.
- [53] Espinosa Marzal R.M., Scherer G.W. Crystallization of sodium sulfate salts in limestones. *Environ. Geol.* **2008**, *56*, 650–621.

- [54] Flatt R.J., Caruso F., Aguilar Sanchez A.M., Scherer G.W. Chemomechanics of salt damage in stone. *Nature Commun.* **2014**, 5, im Druck, doi:10.1038/ncomms5823.
- [55] Charola A.E., Pühringer J., Steiger M. Gypsum: A review of its role in the deterioration of buildings materials. *Environ. Geol.* **2007**, 52, 339–352.
- [56] Steiger M., Kiekbusch J., Nicolai A. An improved model incorporating Pitzer's equations for calculation of thermodynamic properties of pore solutions implemented into an efficient program code. *Constr. Build. Mater.* **2008**, 22, 1841–1850.
- [57] Steiger M. Total volumes of crystalline solids and salt solutions. In: *An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials* (Hrsg.: C.A. Price). Archetype Publications Ltd., London, **2000**, 53–63.
- [58] Davidson C.I., Tang W., Finger S., Tyemezian V., Striegel M.F., Sherwood S.I. Soiling patterns on a tall limestone building. *Environ. Sci. Technol.* **2000**, 34, 560–565.
- [59] Blocken B., Derome D. and Carmeliet J. Rainwater runoff from building facades: a review. *Build. Environ.* **2013**, 60, 339–361.
- [60] Steiger M. Influence of salts on the freezing temperature of water: implications on frost damage to porous materials. In: *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* (Hrsg.: Kwiatkowski D, Löfvendahl R.), ICOMOS, Stockholm, **2004**, 179–186.
- [61] WTA-Merkblatt 3-17 (Ausgabe 08.2009/D): *Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen*. Fraunhofer IRB-Verlag, **2009**, 20 S.
- [62] Klaas H., Schulz E. *Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk*. Reihe Schadenfreies Bauen, Bd. 13, Fraunhofer IRB Verlag, **2002**, 214 S.