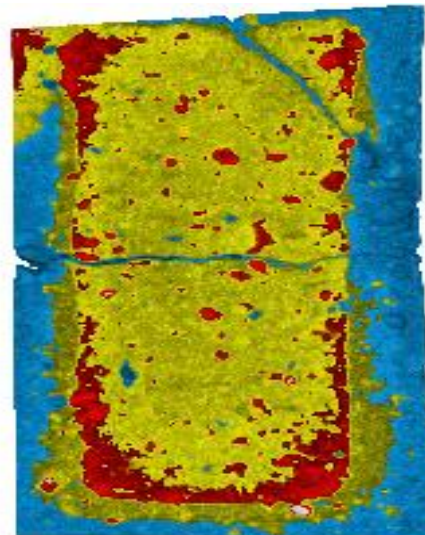


**MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER DRUCKLOSEN
INJEKTIONSMITTEL - APPLIKATION
IN MAUERWERKSBAUSTOFFEN**



PhD - Thesis

von

Astrid Walter M.Sc.

zur Erlangung des akademischen Grades

Ph.D. in Architectural Engineering

der Universität Pécs

Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik/

Marcel Breuer Doctoral School

November 2018

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen einer Kooperation zwischen der Marcel Breuer Doctoral School der Universität Pécs/Ungarn sowie der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Hochschule Wismar. Allen an dieser Kooperation Beteiligten sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Besonders möchte ich mich bedanken...

- zuallererst bei meinen Kindern Lena und Felix – Danke für Euer Verständnis und die Rücksichtnahme.
- bei meiner Familie und meinen FreundInnen, die mich in dieser Zeit sehr unterstützt haben.
- Frau Dr. Adél Len vom Budapest Neutron Centre für die Betreuung der vorliegenden Arbeit
- Herrn Dr. Zoltan Kis vom Budapest Neutron Centre für die Unterstützung bei den durchgeführten Untersuchungen

Für Papa

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung/Abstract

Formeln und Abkürzungen

1	Einleitung und Problemstellung	8
1.1	Thesen zur Injektionsmittelausbreitung im Mauerwerk.....	10
1.1.1	These 1	10
1.1.2	These 2	10
1.1.3	These 3	11
1.1.4	These 4	11
2	Derzeitiger Kenntnisstand	11
3	Theoretischer Hintergrund	13
3.1	Lastfälle und Feuchtebeaufschlagung von Gebäuden	13
3.2	Kapillarität und Feuchtetransport in mineralischen Baustoffen.....	15
3.3	Nachträgliche Horizontalabdichtung	19
3.3.1	Verwendete Injektionsmittel (IM) bei druckloser Applikation	20
3.4	Ausbreitung von Injektionsmitteln in mineralischen Baustoffen	22
3.5	Kernphysikalische Untersuchungen als Möglichkeit der Werkstoffprüfung.....	26
3.5.1	Allgemeines	26
3.5.2	Abgrenzung zur Röntgenstrahlung.....	27
3.5.3	Grundlagen.....	28
3.5.4	Grundprinzip des Messverfahrens	29
3.5.5	Bildgebende Darstellung mittels kernphysikalischer Untersuchungen	31
3.5.6	Forschungsreaktor BNC.....	32
3.5.7	Untersuchte Prüfkörper	34
4	Versuchsordnung und Durchführung	36
4.1	Injektionsmittel-Applikation von Mauerwerksbaustoffen.....	36
4.1.1	Allgemeines	36
4.1.2	Vorbereitende Maßnahmen	37
4.1.3	Sättigungsfeuchte.....	38
4.1.4	Einstellung des Durchfeuchtungsgrades D(g)	38
4.1.5	Applikation des Injektionsmittels (IM)	39
4.1.6	Spalten der Prüfkörper	40
4.1.7	Tropfenaufsetztest	42
4.2	Kernphysikalische Untersuchungen	44
5	Ergebnisse	44
5.1	Injektionsmittelapplikation	44
5.1.1	Studie 1: Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch I	45
5.1.2	Studie 2: Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch II	47
5.1.3	Studie 3: Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme I	49
5.1.4	Studie 4: Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme II	51
5.1.5	Studie 5: Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung.....	53
5.1.6	Studie 6: Klinker/Kalksandstein mit Verkieselung.....	55

5.1.7	Studie 7: Ziegel/Kalksandstein mit IM-Creme.....	57
5.2	Kernphysikalische Untersuchungen	60
5.2.1	Neutronenradiografie	60
5.2.2	Neutronentomografie	66
6	Auswertung der Ergebnisse	79
6.1	Injektionsmittelapplikation	79
6.1.1	Verwendete Materialien	80
6.1.2	Injektionsmittel	82
6.2	Modellierung der Injektionsmittelausbreitung.....	82
6.2.1	Grundlage der Modellierung.....	82
6.2.2	Beispielhafte Anwendung der Modellierung	89
6.3	Kernphysikalische Untersuchungen	94
6.4	Auswirkung der Untersuchungsergebnisse auf die Ausführung der nachträglichen horizontalen Abdichtung mittels IM-Applikation.....	95
7	Evaluation der vorgenannten Thesen.....	96
7.1	These 1	96
7.2	These 2	96
7.3	These 3	96
7.4	These 4	97
8	Zusammenfassung und Bewertung sowie weiterer Forschungsansatz	97
9	Ehrenwörtliche Erklärung	99
Anhang		
	Bild und Tabellenverzeichnis.....	A1
	Detaillierte Analytik.....	A4
	Literaturverzeichnis.....	A17

Zusammenfassung

Weltweit sind viele Gebäude und insbesondere Kulturdenkmäler durch aufsteigende Feuchte infolge fehlender/nicht funktionsfähiger horizontaler Abdichtung in Mitleidenschaft gezogen, deren Erhalt es für nachfolgende Generationen zu sichern gilt.

Eine Möglichkeit der Sanierung sieht hierbei vor, hydrophobierend wirkende Injektionsmittel drucklos zu applizieren. Die Ergebnisse der Abdichtungsmaßnahme sind jedoch vielfach variierend, so dass oftmals das Verfahren per se in Frage gestellt wird. Dieses Phänomen war Anlass, Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen des drucklosen Verfahrens an üblichen Mauerwerksbaustoffen durchzuführen.

Als Ergebnis der vorgenannten Untersuchungen bleiben mehrere Faktoren festzuhalten, welche sich auf die Ausbreitung eines Injektionsmittels anhand des Verfahrens der drucklosen Applikation limitierend auswirken können, insbesondere der jeweilige Durchfeuchtungsgrad des Baustoffes.

Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse lässt sich eine Modellierung zur Injektionsmittelausbreitung ableiten, anhand derer Aussagen zum auszuführenden Bohrlochabstand wie auch generell zur Funktionsfähigkeit einer Abdichtung getroffen werden können. Ergänzend hierzu ist es möglich, unter Zuhilfenahme kernphysikalischer Untersuchungsmethoden die Verteilung des Injektionsmittels im Baustoff dreidimensional darzustellen und somit eine Erklärung für diverse Fehlleistungen in der Baupraxis zu liefern.

Abstract

There are historic buildings and monuments all over the world which are affected by rising damp caused by either a missing or a non-functional horizontal seal. It would be valuable to preserve these buildings for future generations.

One possible remedy is the application of a subsequent horizontal seal by means of a pressureless injection method. The results however are so variable that the method itself is often questioned. This phenomenon prompted the following research into the possibilities and limitations of the pressureless injection method in common building materials.

The investigation shows that several factors have a limiting effect on the spread of an injection agent, particularly the existing degree of moisture penetration. From these results, a model of the distribution of the injection agent can be derived, from which statements can be made regarding the borehole distance to be drilled and the general functionality of the seal.

It is also possible to present the distribution of the injection agent in the building material three-dimensionally with the help of neutron imaging and thus explain various failures in construction practice.

Formeln und Abkürzungen

<p>w-Wert</p>	<p>Wasseraufnahmekoeffizient nach EN ISO 15148</p> $W_{24} = \frac{\Delta m}{A \cdot h^{0,5}}$ <p> W_{24} Wasseraufnahmekoeffizient (kg/m² h^{0,5}) A Saugfläche in (m²) $h^{0,5}$ Saugzeit des Baustoffes (h) </p>	<p>(1)</p>
<p>n</p>	<p>Porosität</p> $n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \times 100\%$ <p> n Porosität (%) ρ Rohdichte (kg/dm³) ρ_0 Reindichte (kg/dm³) </p>	<p>(2)</p>
<p>E_λ</p>	<p>Lambert-Beer'sches Gesetz</p> $E_\lambda = \log_{10} \frac{I_0}{I_1} = \varepsilon_\lambda c d$ <p> E Extinktion (Absorbanz), dimensionslos I_0 Intensität eingestrahltener Strahlung (W/m²) I_1 Intensität der transmittierten Strahlung (W/m²) c Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz (mol/l) ε_λ dekadischer Extinktionskoeffizient bei Wellenlänge λ (spezifische Größe für die absorbierende Substanz) d Schichtdicke des durchstrahlten Körpers (m) </p>	<p>(3)</p>
<p>u_s</p>	<p>Sättigungsfeuchte (m-%)</p> $u_s = \frac{m_s - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100\%$ <p> m_s Masse gesättigt (kg) m_{tr} Masse getrocknet (kg) </p>	<p>(4)</p>

<p>$D(g)$</p>	<p>Durchfeuchtungsgrad gesamt</p> $D(g) = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \%$ <p>u_a aktueller Feuchtegehalt (m.-%) u_s Sättigungsfeuchte (m.-%)</p>	<p>(5)</p>
<p>σ_{SG}</p>	<p>Young'sche Formel zur Grenzflächenspannung</p> $\sigma_{SG} = \sigma_{SL} + \sigma_{LG} \cos \theta$ <p>θ Kontaktwinkel (°) σ_{SG} Grenzflächenspannung fest und gasförmig (kg/s²) σ_{SL} Grenzflächenspannung fest und flüssig (kg/s²) σ_{LG} Grenzflächenspannung flüssig und gasförmig (kg/s²)</p>	<p>(6)</p>
<p>$\cos \theta$</p>	<p>Young'sche Formel zur Kontaktwinkelmessung</p> $\cos \theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$ <p>mit folgenden Abkürzungen: θ Kontaktwinkel (°) σ_L Grenzflächenspannung der Flüssigkeit (kg/s²) σ_s Grenzflächenspannung des Festkörpers (kg/s²) σ_{LS} Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper (kg/s²)</p>	<p>(7)</p>
<p>A_D</p>	<p>Feuchteabhängige Ausbreitung eines Injektionsmittels</p> $A_D = A_{max} - A_k = A_{max} - k_{im} D(g)$ <p>A_D Ausbreitung des IM bei einem bestimmten Durchfeuchtungsgrad (cm) k_{im} Steigung der Geraden, aufgrund des Fallens ist die Steigung hier mit einem negativen Vorzeichen versehen (cm/%) $D(g)$ jeweilig vorhandener Durchfeuchtungsgrad (%) A_{max} maximale Ausbreitung eines IM, gemessen vom Bohrloch (cm)</p>	<p>(8)</p>

k_{im}	<p>IM-Permeabilität</p> $k_{im} = \frac{A_{D1} - A_{D2}}{D_2 - D_1}$ <p> k_{im} IM-Permeabilität (cm/%) A_1 Ausbreitung eines IM bei Punkt 1 (cm) D_1 Durchfeuchtungsgrad bei Punkt 1 (%) A_2 Ausbreitung eines IM bei Punkt 2 (cm) D_2 Durchfeuchtungsgrad bei Punkt 2 (%) </p>	(9)
A_{max}	<p>Maximale Ausbreitung eines Injektionsmittels</p> $A_{max} = -k_{im} D(g) + A_D$ <p> A_{max} maximale Ausbreitung eines Injektionsmittels (cm) k_{im} IM-Permeabilität (cm/%) $D(g)$ Durchfeuchtungsgrad (%) A_D Ausbreitung bei jeweiligem vorhandenen Durchfeuchtungsgrad (cm) </p>	(10)
$B_{theor.}$	<p>Theoretischer Bohrlochabstand</p> $B_{theor} = 2 A_D$ <p> A_D Ausbreitung bei jeweiligem vorhandenen Durchfeuchtungsgrad (cm) </p>	(11)
$B_{prakt.}$	<p>Praktischer Bohrlochabstand</p> $B_{prakt} = \frac{4}{5} B_{theor.}$ <p> $B_{theor.}$ Theoretisch ermittelter Bohrlochabstand (cm) </p>	(12)

IM	Injektionsmittel	(13)
D(g)	Durchfeuchtungsgrad	(14)
w-Wert	Wasseraufnahmekoeffizient	(15)
KS-Stein	Kalksandstein	(16)
TA	Thermische Analyse	(17)
IR	Infrarot	(18)

REM/ESEM	Rasterelektronenmikroskop	(19)
BNC	Budapest Neutron Centre	(20)
RAD	Static/dynamic thermal neutron imaging station	(21)
Mz	Mauerziegel	(22)
NF	Normalformat (240x115x71mm)	(23)
Rel. LF	Relative Luftfeuchte	(24)
1-K IM	Einkomponentiges Injektionsmittel	(25)
IM-Creme	Injektionsmittel-Creme	(26)
IM A/B	Injektionsmittel A/B	(27)

1 Einleitung und Problemstellung

Blickt man im zeitlichen Abriss der Geschichte zurück, so spielt der Schutz von Gebäuden vor Witterungseinflüssen, insbesondere hygriischer Art, seit jeher eine große Rolle [1].

Wasser kann hierbei Gebäude auf verschiedene Arten schädigen: in Form von Schlagregen, Sickerwasser, Kondensation oder auch Hygrokopizität [2]. Die hieraus folgenden Schäden bieten eine breite Palette angefangen von aufsteigender Feuchte bis hin zu sich lösendem Materialverbund und letztendlich einer Querschnittschwächung [3].

Betroffen sind durch vorgenannte Schadenbilder unter anderem viele historische, architektonisch bedeutende Gebäude (Kulturdenkmäler), zum Beispiel in Venedig, deren Erhalt es für nachfolgende Generationen zu sichern gilt. Da dieses Schadenbild sich zudem nicht auf bestimmte Regionen der Welt beschränkt, sondern ubiquitär vorhanden ist, ist eine zielführende Sanierung dahingehend von überregionaler Bedeutung.



Bild 1: Aufsteigende Feuchte an Gebäuden aus Mauerwerk (Quelle: www.passengeronearth.com)



Bild 2: Gebäudeschaden durch aufsteigende Feuchte (Quelle: www.passengeronearth.com)

Eine Möglichkeit der Sanierung von aufsteigender Feuchte bei Mauerwerk sieht vor, eine nachträgliche horizontale Abdichtung auszuführen. Durch das drucklose Einbringen von Injektionsmitteln über Bohrlöcher ist vorgesehen, dass sich in der Ebene der Bohrlöcher ein durchgehender Abdichtungsspiegel ausbildet, der nachfolgend ein weiteres Aufsteigen von Feuchte unterbindet. Die genauen Angaben zur Ausführung (Bohrlochdurchmesser-, abstand, Applikation etc.) werden seitens der Injektionsmittelhersteller vorgegeben.

In der Praxis zeigt sich jedoch, dass vielfach mit Fehlleistungen gerechnet werden muss [4], da sich das applizierte Injektionsmittel offenbar nicht ausreichend ausbreitet, um einen flächigen Abdichtungsspiegel zu bilden [5]. Folglich ist in diesen Bereichen nach wie vor mit aufsteigender Feuchte und einem reduzierten/unzureichenden Abtrocknungsprozess zu rechnen.

Die vorliegende Dissertation greift die vorgenannte Problematik auf und zeigt die Möglichkeiten und Grenzen einer nachträglich durchgeführten Horizontalabdichtung an Mauerwerk. Aufgrund der großen Schwankungsbreite an den erhaltenen Abdichtungsergebnissen beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf die drucklose Applikation von Injektionsmitteln (IM) an Mauerwerksbaustoffen. Das von der Verfasserin mitentwickelte Modell der Injektionsmittelausbreitung [6, 7, 8, 9] soll hierbei zur Ermittlung der Abhängigkeit der Injektionsmittelausbreitung von limitierenden Faktoren herangezogen werden, um letztendlich Aussagen hinsichtlich der Anwendungsgrenzen treffen zu können.

Voruntersuchungen ließen zudem darauf schließen, dass neben der Durchfeuchtung als limitierender Faktor für die IM-Ausbreitung auch der Baustoff und das IM selbst limitierend wirken könnten [6, 10, 11].

Basis der vorgestellten Ergebnisse hierfür sind durchgeführte Studien an der Hochschule Wismar, in welchen verschiedene Injektionsmittel im drucklosen Verfahren an Mauerwerksbaustoffen (Ziegel, Klinker, Kalksandsteine und Mörtel) appliziert wurden. Zur detaillierteren Darstellung der Ergebnisse wurden die einzelnen Baustoffe getrennt voneinander untersucht [11].

In einem weiteren Schritt ist die Verteilung eines IM im Baustoff selbst zu betrachten. Es ist nach wie vor nicht bekannt, ob nach Applikation eines IM im Baustoff generell mit einer gleichmäßigen Verteilung der Reagenzien zu rechnen ist und ob bei einer festgestellten Ausbreitung des IM gleichzeitig auch eine Wirksamkeit, d.h. eine nachweisbare Hydrophobie verbunden ist. Mittels kernphysikalischer Untersuchungen der vorgenannten Proben ist es möglich, Erklärungen für diese Fragen zu finden.

1.1 Thesen zur Injektionsmittelausbreitung in Mauerwerk

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Ausführungen ergeben sich folgende vier Thesen, welche mittels der nachfolgenden Untersuchungen zu belegen sind:

1.1.1 These 1

Die Ausbreitung eines IM im Baustoff ist abhängig vom jeweils vorhandenen Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ und nimmt mit zunehmender Durchfeuchtung des Baustoffes ab.

Es ist nachvollziehbar, dass bei einem niedrigen Durchfeuchtungsgrad und somit auch einer geringeren „Füllung“ des vorhandenen Porenvolumens mit Wasser mehr Injektionsmittel vom Baustoff aufgenommen werden kann als bei einem hohen Durchfeuchtungsgrad.

Ausgehend von einer homogenen Verteilung der hierfür relevanten Kapillarporen würden sich demnach die Ausbreitung des IM zum vorherrschenden Durchfeuchtungsgrad umgekehrt proportional verhalten. Damit wäre davon auszugehen, dass bei hohen Durchfeuchtungsgraden nur sehr geringe Mengen IM noch aufgenommen werden könnten.

Durchgeführte Voruntersuchungen ließen die vorgenannten Tendenzen erkennen, welche jedoch noch mittels detaillierter Untersuchungen an Mauerwerksbaustoffen zu belegen sind.

1.1.2 These 2

Anhand eines Modells zur IM-Ausbreitung lässt sich die vorgenannte Abhängigkeit grafisch darzustellen; zudem lassen sich an dem Modell maximale Durchfeuchtungsgrade ermitteln und geben Aufschluss darüber, bis zu welchem Durchfeuchtungsgrad ein Einsatz des IM erfolgsversprechend ist.

Bei grafischer Darstellung der erhaltenen Untersuchungswerte der Ausbreitung sowie auch des jeweiligen bestehenden Durchfeuchtungsgrades ist ein linearer Zusammenhang erkennbar, der sich als lineare Funktion grafisch darstellen lässt.

Aus den erhaltenen Untersuchungswerten lässt sich eine spezifische IM-Kennlinie erkennen, an deren Extrapolation sich diejenigen Durchfeuchtungsgrade ablesen lassen, bei welchen noch eine ausreichende Ausbreitung des IM gegeben ist, um eine funktionsfähige Abdichtung herzustellen. Zudem können Aussagen hinsichtlich des auszuführenden Bohrlochabstandes getroffen werden, welcher ebenso feuchteabhängig ist, und somit wertvolle Hinweise hinsichtlich einer Ausführung am Gebäude erlangt werden.

1.1.3 These 3

Die Kombination Baustoff und IM bringt je nach verwendeten Materialien unterschiedliche Ergebnisse hervor, welche nicht allgemeingültig auf andere Baustoffe/IM-Kombinationen übertragen werden können.

Unterschiedliche Studien zur IM-Ausbreitung sollen hierbei belegen, dass die erhaltenen Ergebnisse sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausprägung, trotz gleicher Tendenzen der abnehmenden Aufnahme eines IM mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad, nicht zur allgemeinen Übertragbarkeit eignen.

Marktübliche Injektionsmittel und gängige Baumaterialien wie Kalk-Zement-Mörtel, Ziegel, Klinker und Kalk-Sandstein bilden die Basis der durchgeführten Untersuchungen.

1.1.4 These 4

Die Verteilung eines IM erfolgt nicht gleichmäßig, sondern es gibt Zonen unterschiedlich hoher IM-Gehalte, welche sich folglich auch auf die Wirksamkeit der Abdichtung auswirken. Folglich gibt es Unterschiede zwischen Ausbreitgrenze und Wirkgrenze eines IM.

Neben einer visuell erkennbaren Ausbreitung eines IM an der Oberfläche eines Baustoffes ist ein „Blick in das Innere“ desselben nötig, um Aussagen hinsichtlich einer räumlichen Verteilung des IM treffen zu können. Anhand des bislang durchgeführten Tropfenaufsetztestes an der Oberfläche des Baustoffes kann nur lokal an der Oberfläche eine Hydrophobierung nachgewiesen werden. Zur Verteilung im Inneren des Prüfkörpers ist keine Aussage möglich. Ebenso wenig ist bekannt, ob die Verteilung eines IM nach Applikation – in Abhängigkeit von der Distanz zum Bohrloch – gleichmäßig verläuft oder mit vereinzelt Fehlstellen bzw. Anreicherungszonen gerechnet werden muss. Diese können sich wiederum negativ auf den Abdichtungserfolg auswirken.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

Das Thema der nachträglichen horizontalen Abdichtung ist seit geraumer Zeit Gegenstand erhöhter Aufmerksamkeit, besonders in Deutschland und dem benachbarten Ausland [z.B. 12].

Grundsätzlich ist anzumerken, dass es in Deutschland hinsichtlich der Ausführung einer nachträglichen horizontalen Abdichtung keine gesetzliche verankerte Norm bzw. verbindliche Anweisung gibt; in Österreich ist mit der Schaffung der ÖNORM [13] bereits ein weiterer Schritt getan.

In der ÖNORM [13] wie auch in der österreichischen IFB-Richtlinie [14] zur nachträglichen Horizontalabdichtung von Stein- und Mischmauerwerk sind ähnliche Erläuterungen zur Ausführung zu finden. Angaben, ob es neben der erwarteten zunehmenden Füllung der Kapillarporen mit ansteigendem Durchfeuchtungsgrad noch andere Gründe für eine abnehmende Ausbreitung eines IM gibt, geht aus den Ausführungen nicht hervor. Ebenso wenig, ob diese doch recht allgemein gehaltenen Angaben für alle bei der Erstellung eines Mauerwerks verwendbaren Baustoffe sowie für alle am Markt erhältlichen IM gilt oder ob hier Einschränkungen vorzunehmen sind. Der zugehörige Bohrlochabstand wird mit 10 cm angegeben, gleichzeitig ist ein Verweis auf auftretende Fehlleistungen in Zusammenhang mit unberücksichtigten Durchfeuchtungsgraden vor Beginn der Abdichtungsmaßnahme enthalten.

Ob der vorgenannte Bohrlochabstand bei allen Durchfeuchtungsgraden und auch bei unterschiedlichen Baustoff-/IM-Kombinationen sozusagen „universell“ einsetzbar ist, wird in diesem Zusammenhang nicht erwähnt.

In Deutschland wurde mit der Erstellung sowohl des BuFAS-Merkblattes 2009 [15, 74] des Bundesverbandes Feuchte & Altbausanierung e.V. die Thematik der nachträglichen Abdichtung unter verschiedenen Kriterien beleuchtet. Enthalten sind hier neben Parametern zur Planung und Ausführung von Horizontalabdichtungen auch Angaben, wie die Funktionsfähigkeit einer Abdichtung rechnerisch überprüfbar sind. Mittlerweile sind die Erkenntnisse des BuFAS-Merkblattes in das WTA-Merkblatt 4-10 [16] eingeflossen, das BuFAS-Merkblatt ist demzufolge nicht mehr erhältlich [17, 18].

Das vorgenannte WTA-Merkblatt 4-10 [16], welches als Regelwerk bezeichnet werden kann, greift die gegenständliche Thematik auf, benennt als Ziel des Verfahrens, ...“dass das Mauerwerk ausgehend von der Injektionszone die umgebungsbedingte Ausgleichsfeuchte erreicht... [..]. Der kapillare Feuchtenachschub über die wirksame Injektionszone muss demnach nicht generell vollständig unterbunden werden.“ Grundlage hierfür ist eine Ausführung gemäß der im Merkblatt enthaltenen Anforderungen, wobei sich die gegenständlichen Untersuchungsgrundlagen auf Laborversuche und standardisierte Baustoffe beziehen. Hinsichtlich des anzusetzenden Bohrlochabstandes werden Werte zwischen 10 cm und maximal 12,5 cm angegeben. Entgegen der Ausführung der vorgenannten ÖNORM wird als flankierende Maßnahmen keine konvektive Trocknung präferiert, sondern vielmehr die Ausführung einer vertikalen Abdichtung oder eines Sanierputzes. Analog der ÖNORM werden auch hier Voruntersuchungen als unabdingbar erachtet, ebenso eine Kontrolle der Wirksamkeit nach Applikation (siehe auch [67]).

Grundsätzlich ist hierzu anzumerken, dass die Ausführungen des WTA-Merkblattes hinsichtlich der verwendeten Injektionsmittel sich ausschließlich auf WTA-geprüfte IM beziehen. Hierzu sind seitens der Hersteller der IM bestimmte Anforderungen einzuhalten (standardisierte Wirksamkeitsprüfung), um dieses Zertifikat zu erlangen. Nachfolgend ist durch das erhaltene Zertifikat des IM eine vom D(g) (bis 95% + 5%) abhängige Wirksamkeit auf Grundlage des Merkblattes bestätigt [16] und soll demnach die jeweiligen Anwendungsgrenzen aufzeigen.

Zusätzlich sind zwei Prüfvorschriften 01/2010 und 02/2012 des Dahlberg-Institutes für Diagnostik und Instandsetzung historischer Bausubstanz e.V. vorhanden [18, 19], anhand derer zudem der Erfolg einer nachträglichen Abdichtung durch Ermittlung von Reduzierungsfaktoren quantifizierbar dargestellt wird [20, 21].

BALAK/PECH [21] stellen bei Injektionsverfahren bereits ab einem Durchfeuchtungsgrad D(g) zwischen 50% und 60% keine zufriedenstellenden Ergebnisse mehr fest. Ab einem D(g) von 60% halten die Autoren eine Wirksamkeit der Abdichtung für nahezu ausgeschlossen und halten ein Vortrocknen des zu behandelnden Mauerwerkes auf $D(g) < 20\%$ vor Ausführung der Injektionsmaßnahme sowie ein konvektives Nachtrocknen desselben erforderlich [4, 22].

In durchgeführten Studien im Freilandversuch von BALAK [23] wurde die Konzentration des applizierten IM variiert (nach Herstellerangaben, doppelte und halbe Konzentration) und anschließend nachgetrocknet. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass offenbar die Konzentration des IM weniger eine Rolle bei der Ausbreitung des IM zu spielen scheint als die durchgeführte flankierende Nachtrocknung. Im Vergleich hierzu ist bei den dortigen untersuchten Mörtelproben eine geringere Ausbreitung des IM wie auch eine von der Konzentration des IM abhängige Ausbreitung festgestellt worden.

WEBER [24] hingegen führt die Versagensquote von Abdichtungsmaßnahmen weniger als das IM selbst, als vielmehr auf unberücksichtigte Randbedingungen und eine mangelhafte Ausführung an sich zurück. Die Ausgangsmaterialien selbst bzw. die Beschaffenheit der zu sanierenden Umgebung ist hier zudem zu erwähnen [25].

Hinsichtlich der Verwendung von Injektionsmitteln im drucklosen Verfahren gibt es Untersuchungen mit Injektionsgelen auf Silikatbasis, deren Anwendung einen Rückgang des Feuchtegehaltes des Baustoffes ergab [26]. Detaillierte Angaben zu dem Versuchsaufbau sowie den verwendeten Baustoffen fehlen allerdings.

Die Erforschung der Transportmechanismen von Wasser im Baustoff [27, 72] ist ebenso Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen; so sind unterschiedliche Saugspannungskurven von Materialien nach Angaben der Autoren HOLM et al. [28] ursächlich für die jeweilige Wasseraufnahme des Baustoffs. Ein Zusammenhang mit den jeweiligen untersuchten Materialien wird hierbei erwähnt [29].

Weitere Forschungsansätze beschäftigen sich mit hygrothermalen Modellierungen in Baustoffen [30, 31] unter Einbeziehung unterschiedlicher baustofflicher Ausgangsparameter. Gemäß der angeführten Ergebnisse ist der Wasseraufnahmekoeffizient als maßgeblicher Einflussfaktor hinsichtlich der relativen Feuchte im äußeren wie auch inneren Bereich der Wand zu sehen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Thematik Feuchtetransport in Baustoffen durchaus Gegenstand von Forschungen im In- und Ausland ist [u.a. 32, 33, 34, 35, 75]. Es existieren verschiedene Forschungsansätze, welche jedoch aufgrund unterschiedlich gesetzter Schwerpunkte und einer Bandbreite an ausgewählten Materialien nicht miteinander vergleichbar sind. Dies impliziert die Forderung nach einer einheitlichen Prüfvorschrift, anhand derer mittels standardisierter Verfahren vergleichbare Aussagen getroffen werden können.

3 Theoretischer Hintergrund

3.1 Lastfälle und Feuchtebeaufschlagung von Gebäuden

Grundsätzlich kann Wasser auf verschiedene Arten auf ein Gebäude einwirken [36]:

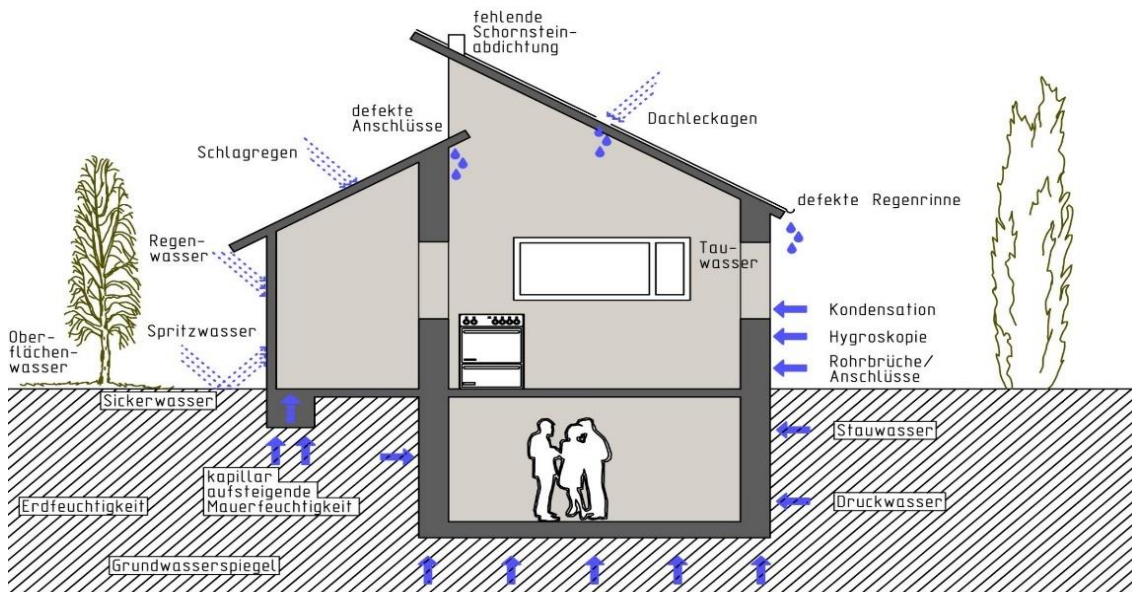


Bild 3: Arten der Feuchtebeaufschlagung von Gebäuden [37]

Einige Möglichkeiten sollen hierbei exemplarisch aufgeführt werden [38]:

- **Regenwasser**
Undichtigkeiten der Gebäudehülle wie beispielsweise defekte Dächer, Rohrleitungen und Anschlüsse von Balkonen und Terrassen sind oftmals die Ursache für Wassereintritt in ein Gebäude. In Gebieten, in welchen Gebäude aufgrund von geografischen Gegebenheiten einer erhöhten Schlagregenexposition ausgesetzt sind, besteht zudem die Gefahr eines Staudrucks auf vertikale Gebäudeteile, wodurch ebenfalls im Bereich von Fugen und/oder Fehlstellen ein Wassereintritt in das Gebäude ermöglicht wird.
- **Bodenfeuchte**
Bei mangelhafter/nicht vorhandener vertikaler und/oder horizontaler Abdichtung besteht zudem die Möglichkeit, dass Grundwasser bzw. Oberflächenwasser infolge Kapillarwirkung des Gebäudes aufgenommen und in das Innere des Gebäudes weitergeleitet wird. Die Folgen einer fehlenden oder mangelhaften horizontalen Abdichtung sind vielfach an dem Schadenbild der aufsteigenden Feuchte, vor allem im Sockelbereich von Unter- und Erdgeschossen erkennbar.
- **Temporäre Feuchtebeaufschlagung**
Hierunter ist die sogenannte Baufeuchte zu verstehen, welche im Zuge der Herstellung des Gebäudes oder des Einbringens/Verarbeitens von Baustoffen entsteht. Ebenso enthalten ist hierbei auch die Wohnfeuchte, welche durch die Nutzung des Gebäudes (kochen, baden etc.) entsteht.
- **Konstruktiv bedingter Wasseranfall im Gebäude**
Eine Kondensation von Wasser kann erfolgen, indem bei relativ hoher Luftfeuchte Wasserdampf kondensiert und sich dieses anfallende Wasser an kühleren Bauteilen als Tauwasser absetzt. Neben einer Verschlechterung des Raumklimas ist im weiteren Zeitverlauf ohne Behebung des Lastfalls meist mit einer nachfolgenden Schimmelpilzbildung zu rechnen.

Wie aus der vorgenannten Aufzählung hervorgeht, ist ein Wassereintritt in ein Gebäude oftmals mit der Thematik der Abdichtung verknüpft. Während bei Gebäuden älterer Erstellungsphasen oftmals eine vertikale/horizontale Abdichtung nicht vorgesehen war bzw. ggf. aufgrund des Alters möglicherweise auch nicht mehr funktionsfähig ist, so ist man doch im Laufe der Zeit dazu übergegangen, bei Neubauten durch Vorgabe einer gesetzlichen Richtlinie gleich zu Beginn der Baumaßnahme einen Feuchteschutz auszuführen. Hierzu können in Deutschland seit Juli 2017 die Normen DIN 18531 bis 18135 im Nachgang zu der bis dahin gültigen DIN 18195 herangezogen werden.

Die Folgen der Feuchtebeaufschlagung eines Gebäudes sind von der Ausprägung her vielfältig, jedoch allesamt sowohl für die Gebäudesubstanz wie auch für die Bewohner nachteilig. Hierunter fallen beispielsweise Auswirkungen wie beispielsweise [44]:

- Erhöhter Aufwand zur Beheizung des Gebäudes
- Niedrigere Wärmedämmfähigkeit aufgrund des Wassergehaltes im Baustoff
- Gefügesprengung von Bausubstanz infolge Volumenvergrößerung des Wassers durch Frost
- Bildung von Ausblühungen durch Auskristallisation von Salzen an der Oberfläche der Bausubstanz infolge Verdunstungsvorgänge
- Korrosion von Bewehrung mit nachfolgender Zerstörung der Gebäudesubstanz aufgrund Volumenvergrößerung infolge der Korrosionsvorgänge
- Mikrobielle Besiedelung infolge erhöhten Feuchteanfalles
- Verringerung des Nutzwertes des Gebäudes

Das Wasser selbst kann hierbei in verschiedenen Aggregatzuständen wie flüssig, fest und gasförmig vorliegen.

Anhand vorgenannter Ausführungen lässt sich die immense Bedeutung des Feuchteschutzes für Gebäude erkennen. Neben einer präventiven Ausführung bei einer Neubaumaßnahme ist jedoch auch gleichzeitig die Relevanz bei einer nachträglich durchgeführten Maßnahme zur Sanierung evident.

In Abhängigkeit von dem jeweiligen eingetretenen Lastfall ist auch die entsprechende auszuführende Methodik, sei es im Zuge einer Neuerstellung eines Gebäudes oder auch als Maßnahme im Schadenfall, zu wählen.

3.2 Kapillarität und Feuchtetransport in mineralischen Baustoffen

Der Transport von Wasser, welches sich oftmals bei einer Beaufschlagung des Gebäudes als schädigender Faktor herausstellt, ebenso wie der Transport eines applizierten Injektionsmittels werden gleichermaßen durch das Porensystem eines Baustoffs dargestellt. Nach MOSCHIG [39] ist für den Durchfeuchtungsgrad von Bauteilen deren Saugfähigkeit ausschlaggebend. Der Transport der Feuchtigkeit erfolgt hierbei von den Grobporen zu den Feinporen, wobei hierfür die Lage der Poren zueinander im Baustoff ausschlaggebend ist [39].

Bei WEBER [1] lässt sich hierzu nachfolgende schematische Darstellung finden.

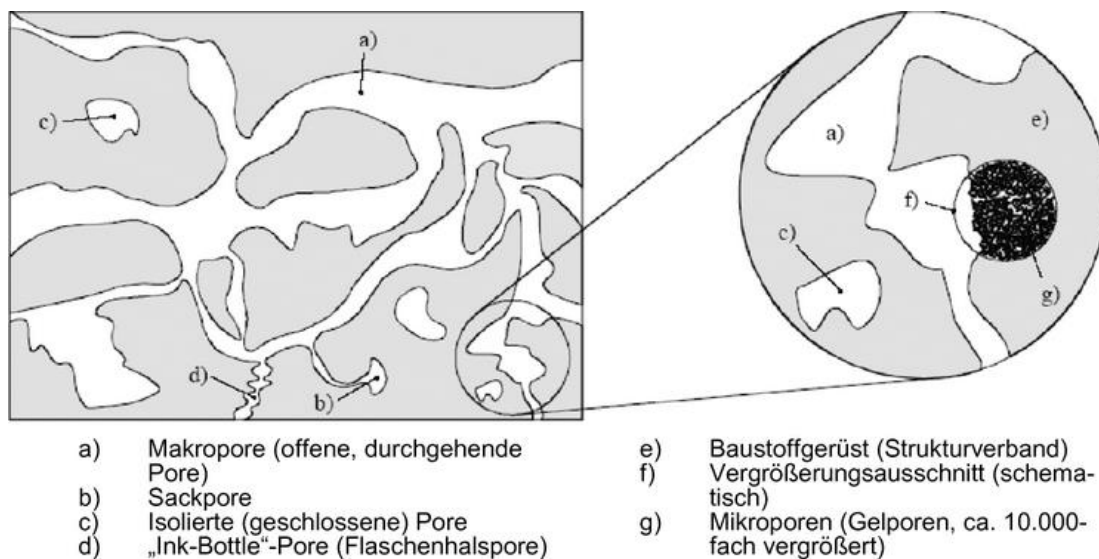


Bild 4: Unterschiedliche Porenarten [1]

Anhand dieses Bildes lässt sich bereits ableiten, dass sowohl die Anzahl, die Verteilung und auch die Anordnung der für den Wasser- und IM-Transport relevanten Kapillarporen ausschlaggebend hinsichtlich der Funktionsfähigkeit einer nachträglichen Abdichtung sind.

Das Vermögen eines Baustoffes, Wasser aufzunehmen und in das Porensystem einzulagern, lässt sich hierbei mittels des Wasseraufnahmekoeffizienten w nach EN ISO 15148 [40] bestimmen [71]. Hierzu wird ein getrockneter Baustoff-Prüfkörper in bestimmten Zeitintervallen mit Wasser beaufschlagt, nachfolgend die Massenänderung ermittelt in Funktion zur Zeit t gesetzt:

$$w_{24} = \frac{\Delta m}{A \cdot h^{0,5}} \quad (1)$$

mit folgenden Abkürzungen:

- w_{24} Wasseraufnahmekoeffizient ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{h}^{0,5}$)
- Δm Massenänderung (kg)
- A Saugfläche (m^2)
- t Saugzeit des Baustoffes (h)

Anhand der erhaltenen Ergebnisse lässt sich ein Baustoff hinsichtlich des kapillaren Saugvermögens wie folgt einteilen [1]:

Tab. 1: Klassifizierung der Wasseraufnahme von Baustoffen mittels Wasseraufnahmekoeffizient

w-Wert	Klassifizierung
$> 2,000 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$	stark saugend
$\leq 2,000 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$	wasserhemmend
$\leq 0,500 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$	wasserabweisend
$\leq 0,001 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$	wasserdicht

Neben einer Auswirkung auf den Transport von Wasser und IM ist der Gehalt an Poren in einem Baustoff zudem bestimmend hinsichtlich der Porosität, welche gemäß nachfolgender Formel ermittelt werden kann:

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

mit nachfolgenden Abkürzungen:

n	Porosität (%)
ρ	Rohdichte (kg/dm ³)
ρ_0	Reindichte (kg/dm ³)

Die Porosität beeinflusst neben den Eigenschaften eines Baustoffes im eigentlichen Sinne wie beispielsweise das E-Modul und die Festigkeit auch den Widerstand gegen das Eindringen flüssiger oder gasförmiger Stoffe [41]. Neben der Methode der Quecksilberporosimetrie zur Bestimmung der Porosität ist es mittels lichtoptischer Methoden möglich, Aussagen zum Feuchtegehalt eines porösen Materials zu bestimmen [42].

Die Darstellung der Fechteaufnahme eines Baustoffes bei konstanter Temperatur und unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten kann anhand Sorptionsisothermen dargestellt werden [42], welche auch grafisch dargestellt werden können [1].

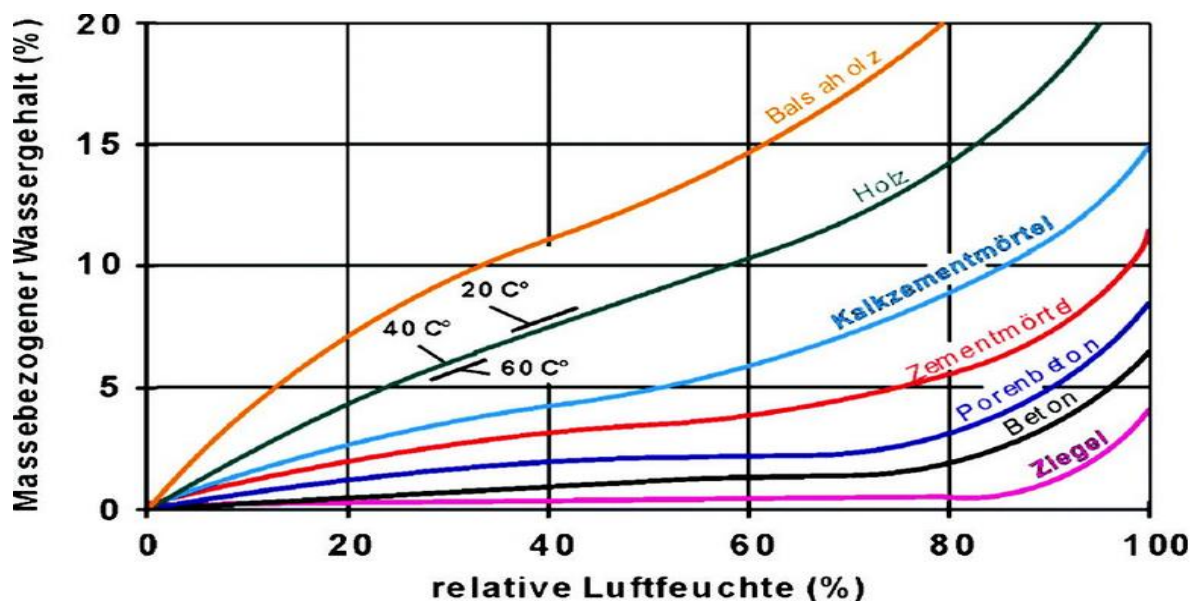


Bild 5: Sorptionsisothermen verschiedener Baustoffe [1]

In erster Linie findet der Transport beider Medien durch die vorhandenen Kapillarporen (Größenordnung 10⁻⁴ bis 10⁻⁷m) statt [43], wobei verschiedene Transportweisen auftreten können [38], welche hier der Vollständigkeit erwähnt werden sollen:

- Diffusion
- Laminare Strömung
- Kapillarer Transport
- Osmose

- Luftströmung
- Wasserverdunstung

Unter den Kapillaren selbst, welche für den gegenständlichen Wasser- und auch IM-Transport verantwortlich zeichnen, versteht man langgestreckte Hohlräume [43, 76] mit einem Innendurchmesser, der wie bereits erwähnt in der Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-7} m liegt.

Die Kapillarität, also das Verhalten von Flüssigkeiten bei Kontakt mit Kapillaren, bezeichnet hierbei die durch die Oberflächenspannung auftretenden Effekte, während die Grenzflächenspannungen zwischen Flüssigkeit, Porenwandung und Luft für das Aufsteigen oder Zurückbleiben der Flüssigkeit in der Kapillare verantwortlich sind [36, 44].

Nachfolgende Darstellung veranschaulicht nochmals den vorgenannten Zusammenhang [45].

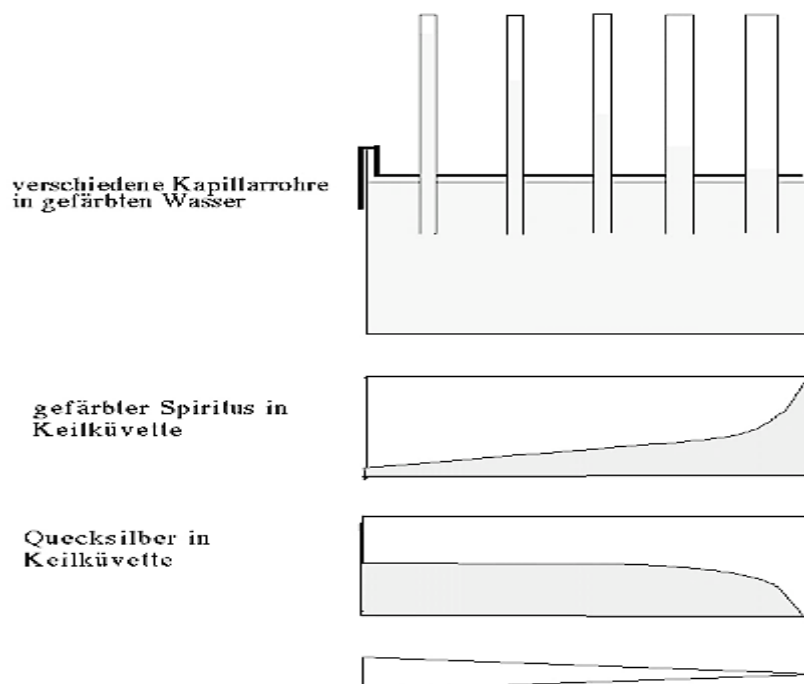


Bild 6: Steighöhe von Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom Kapillardurchmesser [45]

Mit abnehmendem Durchmesser der Kapillare nimmt die Steighöhe der Flüssigkeit zu, die vorhandenen Grenzflächenspannungen sind wiederum für die Aszendenz oder Deszendenz des Flüssigkeitsrandes in der Kapillare entscheidend.

Hinsichtlich des Vorhandenseins der Kapillarporen im Baustoff bleibt festzuhalten, dass ein grundsätzliches Problem bei hohen Durchfeuchtungsgraden der bereits mit Wasser gefüllte Porenraum der Kapillarporen [9] ist. Das heißt, mit ansteigendem Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ und der damit zunehmenden Füllung von Kapillarporen mit Wasser kann davon ausgegangen werden, dass von diesen auch weniger IM aufgenommen wird [46] und die Wahrscheinlichkeit, dass sich nach erfolgter IM-Applikation bei hohen Durchfeuchtungsgraden ein vollflächiger Abdichtungsspiegel ausbildet, sinkt [6].

3.3 Nachträgliche Horizontalabdichtung

Grundsätzlich kann eine nachträgliche Horizontalabdichtung auf verschiedene Arten ausgeführt werden, dabei ist das zu wählende Verfahren auf das zu sanierende Bauwerk abzustimmen [47].

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die möglichen Verfahren gegeben, zur detaillierten Darstellung der Verfahren wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [21].

Hinsichtlich der nachträglichen Horizontalabdichtung werden grundlegend drei unterschiedliche Möglichkeiten unterschieden:

- **Mechanische Verfahren [48]**
Durch das Einbringen von Abdichtungsmaterialien (z.B. Dichtungsbahnen, Stahlbleche, Dichtbeton etc.) wird ein kapillarer Feuchtetransport unterbunden. Maßnahmen wie Maueraustauschverfahren, Chromstahlblechverfahren, Bohrkernverfahren sowie Sägeverfahren stellen hier die gängigsten Verfahren dar.



Bild 7: Einbringen von Sperrbahnen anhand einer vorab eingebrachten horizontalen Aussparung [1]

- **Injektionsverfahren [49]**
Grundsätzlich ist hinsichtlich der Injektionsverfahren anzumerken, dass die Wirksamkeit dieser Verfahren auf einer Beeinflussung des Feuchtetransportvorgänge im Baustoff selbst beruht. Dies wird durch das Einbringen eines Injektionsmittels (IM) dargestellt, welches die vorhandenen Porenräume im Baustoff mittels verschiedener Wirkprinzipien (hydrophobierend, verengend, verstopfend oder auch in Kombination der vorgenannten Wirkweisen) dahingehend verändert, dass ein Transport von Wasser nur noch in stark reduzierter Form oder optimalerweise gar nicht mehr stattfindet [36].

Bei Injektionsverfahren wird grundsätzlich zwischen Applikationen mit Druck und ohne Druck unterschieden. Ziel beider Anwendungen ist das Einbringen von Injektionsmitteln in den Baustoff mit der nachträglichen Ausbildung eines horizontalen Abdichtungsspiegels.

Bei der Druckvariante werden die IM mittels Packer in den Baustoff appliziert; höhere Drücke werden eher bei der Injektion in Betonbauwerken verwendet, während im Mauerwerk eher mit niederen Drücken gearbeitet wird [50].

Auf die drucklose Injektionsmethode, welche bei den nachfolgend vorgestellten Untersuchungen durchgeführt wurde, soll etwas detaillierter eingegangen werden.

Bei dieser Art der Ausführung wird IM meist über Kartuschen-Vorratsbehälter oder mittels Saugwinkel in das Mauerwerk eingebracht und verteilt sich nachfolgend über das Porensystem in den Baustoff; nachfolgend werden diese IM als „klassisch“ bezeichnet. Ergänzend hierzu sind seit einigen Jahren cremeförmige IM auf dem Markt, welche anhand Handspritzen in den Baustoff appliziert werden.



Bild 8: Drucklose Applikation von IM an Mauerwerk. Die Kartuschen sind in ein geneigtes Bohrloch eingebracht; durch die Neigung der Kartusche erfolgt ein kontinuierlicher Nachlauf von IM in das Bohrloch (Quelle: Dahlberg-Institut Wismar)

- Die in der Literatur gelegentlich noch enthaltenen elektrophysikalischen Verfahren werden aufgrund nicht nachgewiesener/nicht feststellbarer Wirksamkeit [16] nur noch der Vollständigkeit halber erwähnt.

3.3.1 Verwendete Injektionsmittel (IM) bei druckloser Applikation

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die hinsichtlich einer drucklosen Applikation Verwendung findenden Injektionsmittel beispielsweise eine Reihe von geeigneten chemisch-physikalischen Eigenschaften aufweisen (sollten), damit eine Ausbreitung im Baustoff gewährleistet ist [1]:

- Niedrige Viskosität
- Bestandteile niedriger Molekülmasse
- Keine Wechselwirkungen mit Wasser und Salzen

Eine Zusammenstellung der bei Injektionen verwendeten IM findet sich bei BALAK/PECH [21] und ist hier in gekürzter Form, bezogen ausschließlich auf die drucklose Injektion, wiedergegeben:

Tab. 2: Verwendete Injektionsmittel bei druckloser Injektion, modifiziert nach [21]

Injektionsmittel	Wirkprinzip	
	porenverschließend	hydrophobierend
Kunsthharzlösungen	•	
Siloxanlösungen		•
Silikonharzlösungen		•
Kieselsäureethylester		•
Paraffinschmelzen	•	
Silikon-Mikroemulsion		•
Alkalisilikate	•	
Methylsilikonate		•
Höheralkylierte Silikonate		•
Alkalisilikonate/Alkalisilikate	•	•
Silancreme		•

Hinsichtlich der vielfach im drucklosen Verfahren verwendeten IM auf Basis von Silanen, Siloxanen wie auch Silikonharz ist anzumerken, dass sich die enthaltenen Inhaltsstoffe der vorgenannten Substanzen sich vor allem bezüglich der Struktur und Partikelgröße unterscheiden [51].

Eine andere Unterscheidung der IM kann hinsichtlich des enthaltenen Lösungsmittels (Wasser oder organische Lösungsmittel) vorgenommen werden. Produkte auf wässriger Basis werden als mehr oder weniger mischbar mit Wasser eingestuft, während IM auf Lösungsmittelbasis, welche nicht mit Wasser mischbar sind, über Druckapplikation in den Baustoff eingebracht werden [52].

Die Mehrzahl der bei diesem Verfahren verwendeten IM weist somit eine eher hydrophobie-rende als porenverschließende Wirkweise auf. Im WTA-Merkblatt 4-10 [16] ist hierzu noch eine detaillierte Einteilung vorhanden, welche nach vier Wirkprinzipien gegliedert ist:

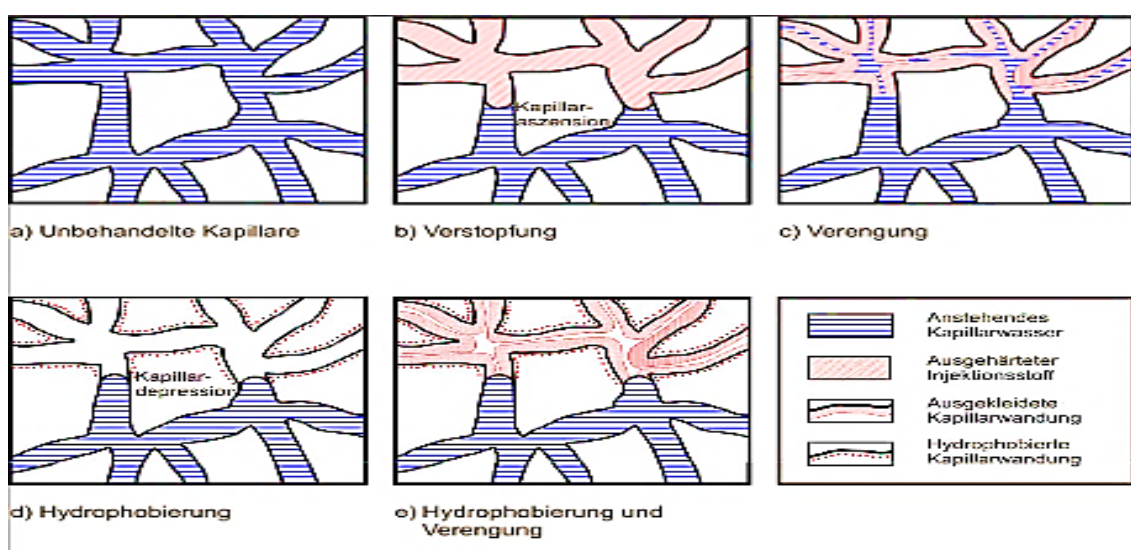


Bild 9: Wirkprinzipien von Injektionsmitteln nach WTA-Merkblatt 4-10 [16]

Die in den nachfolgenden Studien verwendeten IM sind sowohl den „klassischen IM“, welche mittels Kartuschenverfahren appliziert werden, wie auch den cremeförmigen IM zuzuordnen.

Während die bereits erwähnten „klassischen“ Injektionsmittel vorwiegend im Kartuschen- (über Vorratsbehälter) bzw. im Saugwinkelverfahren (mittels eines Kunststoffwinkels mit/ohne Kapillärstäbchen) appliziert werden, ist bei der Applikation der IM-Creme meist eine Applikation mittels Spritzen üblich.

Die seit einigen Jahren erhältlichen IM-Cremes [77] werden vorwiegend in waagrechte Bohrkanaäle im Bereich von Lagerfugen eingebracht und sind nach Angaben auch für hoch durchfeuchtetes Mauerwerk geeignet; Hohlräumigkeit wie auch Klüftigkeit sollen hierbei keine Anwendungsgrenzen darstellen [1, 77]. Anzumerken ist diesem Zusammenhang, dass hinsichtlich der vorgenannten Ausführung ein Mindestwirkstoffgehalt von 70% vorausgesetzt wird [1, 13].

Die Ausbreitung der klassischen IM erfolgt dabei in erster Linie durch Kapillarität und Schwerkraft, während bei den cremeförmigen IM eher von einer Ausbreitung aufgrund des Prinzips des Konzentrationsausgleiches von Flüssigkeiten sowie Diffusionsvorgängen in die Kapillaren des Baustoffes ausgegangen wird [21]. Auf welchen Untersuchungen jedoch diese Ausführungen basieren, wird nicht erwähnt. Vielmehr wird hinsichtlich der IM-Creme auf eine Anwendung bis 100% D(g) verwiesen, während bei klassischen IM ab einem D(g) zwischen 50% und 60% nach Angabe der Autoren keine ausreichende Ausbreitung stattfindet.

3.4 Ausbreitung von Injektionsmitteln in mineralischen Baustoffen

Grundsätzlich gibt es verschiedene Arten, die Ausbreitung von Injektionsmitteln in Baustoffen darzustellen, die wichtigsten sind nachfolgend erwähnt.

- Anfärbung des IM
Durch Farbzusätze im IM ist nach erfolgter Applikation eine Verfärbung des Baustoffes gegeben. Dies ist jedoch nur als erster Anhaltspunkt zu verstehen, Aussagen hinsichtlich einer gleichzeitig damit verbundenen Wirksamkeit sind nur in Verbindung mit weiteren Untersuchungen möglich.



Bild 10: Verfärbung des Baustoffes durch Zugabe von Farbstoff zum IM [11].

- Tropfenaufsetztest/Ermittlung des Benetzungswinkels
Nach erfolgter Abdichtung und Spalten des Prüfkörpers ist nach Durchführung des Tropfen-
aufsetztests bei Vorhandensein des IM eine Hydrophobie des Baustoffes erkennbar. Durch
wiederholte Durchführung lässt sich so der hydrophobierte Bereich erkennen und anhand
Randwinkelmessungen der aufgesetzten Tropfen auch messtechnisch erfassen. Der Über-
gang hydrophobierter Bereich/unbehandelter Bereich ist jedoch nur grob erfassbar und als
„erste Einschätzung“ zu verstehen.



Bild 11: Hydrophobie von Mörtelprüfkörpern nach erfolgter IM-Applikation

- Nachweis der Hydrophobie durch Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert)
Der nach DIN EN ISO 15148 ermittelte w-Wert gibt Aufschluss über die Wasseraufnahme
eines Baustoffes nach erfolgter Applikation [40]. Prüfungen ganzer Probekörper sind grund-
sätzlich möglich, jedoch besteht bei reduzierter Ausbreitung die Möglichkeit, auch nicht be-
handelte Bereiche während der Messung zu erfassen und die Ergebnisse dahingehend zu
verfälschen.

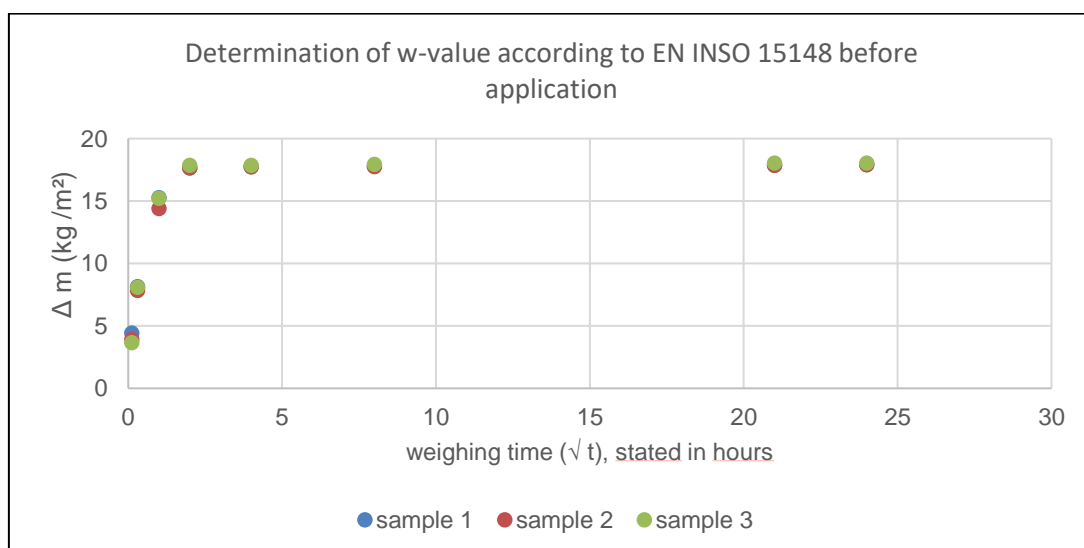


Bild 12: w-Wert von Ziegelproben vor erfolgter Hydrophobierung [7].

Nach einem raschen Anstieg der Wasseraufnahme ist ein nachfolgender gleichförmiger Verlauf des w-Wertes erkennbar, welcher auf eine nahezu vollständige Füllung der Kapillarporen mit Wasser hindeutet.

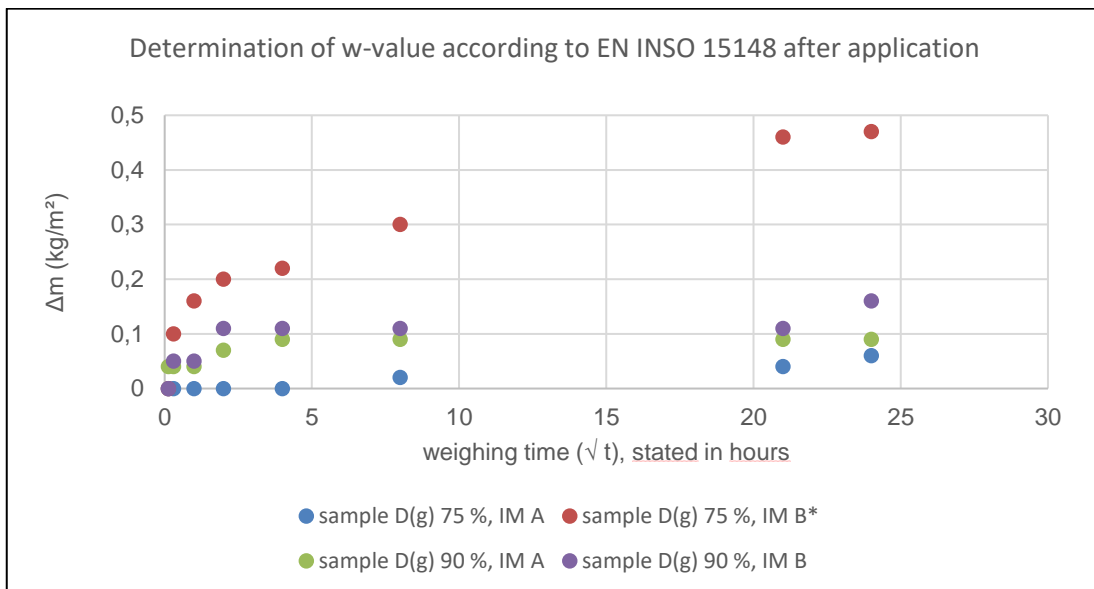


Bild 13: w-Wert von Ziegelproben nach erfolgter Hydrophobierung [7]. Nach Applikation des IM zeigen sich erheblich niedrigere w-Werte. Der w-Wert von IM B, D(g) 75% rührt von einem Prüfkörper her, bei welchem nicht behandelte Bereiche vorhanden waren und hierdurch ungehinderte Wasseraufnahme während der w-Wert-Untersuchung stattfinden konnte.

- Analytische Verfahren [53]
Anhand analytischer Verfahren wie der Infrarot (IR)-Spektroskopie wie auch der Thermischen Analyse (TA) [68] als Nachweisverfahren für Kunststoffe ist ein quantitativer/qualitativer Ansatz vorhandener IM-Gehalte über Abgleich der erhaltenen Messwerte mit Datenbanken bzw. bekannten Zersetzungstemperaturen bekannter Kunststoffe möglich. Untersuchungen ganzer Prüfkörper sind nicht möglich, denn das Probenmaterial wird teils gemahlen benötigt und lässt daher nur Rückschlüsse auf begrenzte Bereiche eines untersuchten Prüfkörpers zu. Aufgrund der zerstörenden Verfahrensweise sind mehrfache Untersuchungen an derselben Probe nicht möglich.

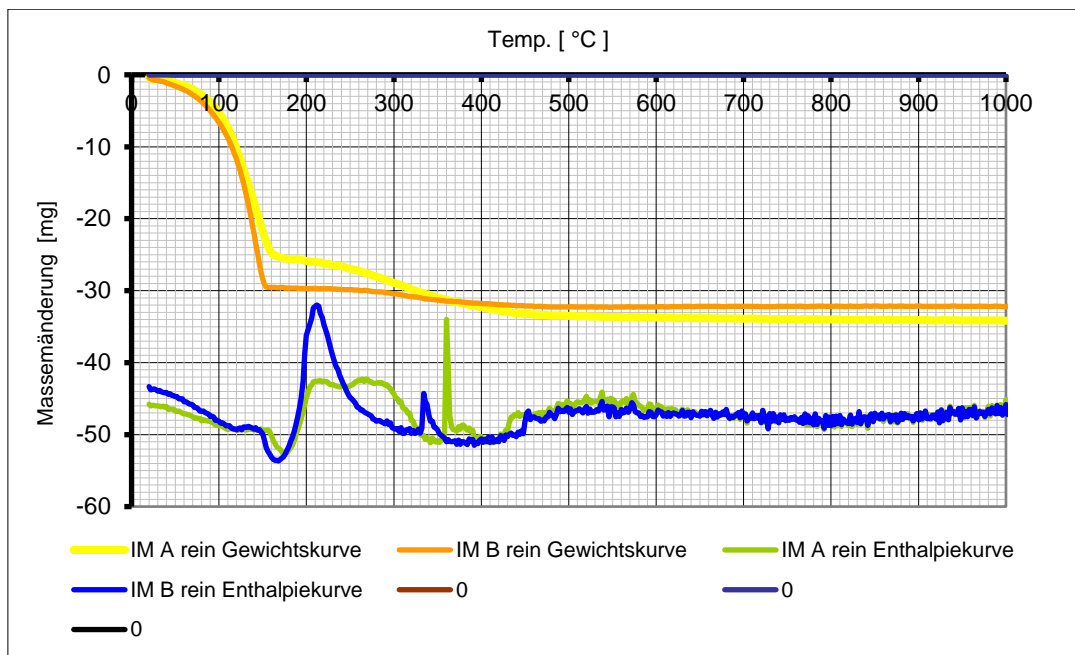


Bild 14: Zersetzungstemperatur bei 370° C von hydrophobierend wirkenden IM, Applikation in Ziegelprüfkörper; Untersuchung mittels Differenz-Thermo-Analyse (DTA), [53]. Die Bezeichnung „Gewichtskurve“ ist gemäß aktueller Definition nunmehr als „Massenkurve“ zu bezeichnen.

- Visuelle Darstellung von Tautropfen im Porenraum
Durch Betauung kann Hydrophilie bzw. Hydrophobie mittels REM-/ESEM-Verfahren im Porenraum von Baustoffen detailliert kenntlich gemacht werden [54, 55]. Erfasst werden können hiermit kleine Porenräume, eine Untersuchung ganzer Prüfkörper ist jedoch nicht möglich.

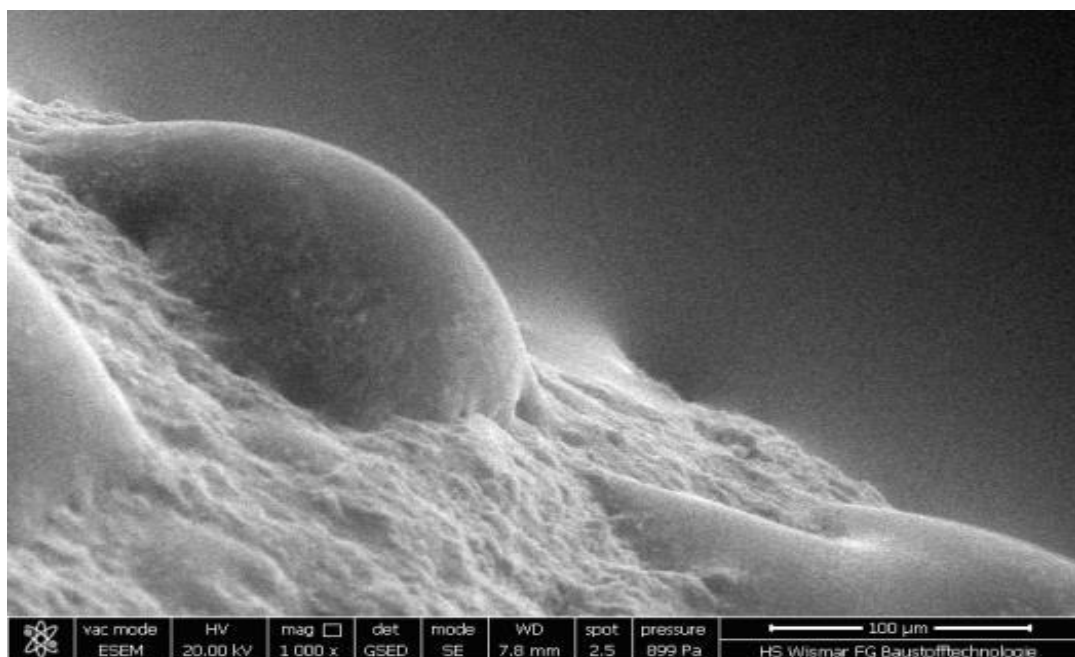


Bild 15: Tautropfenbildung im Porenraum [54], diese lässt sich durch Betauung im REM-/ESEM-Verfahren darstellen.

Mittels verschiedener Verfahren sind somit - in Abhängigkeit vom Untersuchungsziel - durchaus Angaben zum Vorhandensein und zur Ausbreitung eines IM im Baustoff möglich. Jedoch ist die Prüfung kompletter Einzelprüfkörper und „ein Blick in das Innere eines Prüfkörpers“ nicht möglich.

3.5 Kernphysikalische Untersuchungen als Möglichkeiten der Werkstoffprüfung

3.5.1 Allgemeines

Eine weitere Möglichkeit der Werkstoffprüfung zur Darstellung der Ausbreitung von IM im Baustoff kann mittels Neutron Imaging, vormals auch als Neutronenradiografie bezeichnet, erfolgen [56, 69, 70, 73, 78, 79].

Der Vorteil im Vergleich zu anderen Verfahren besteht darin, dass in situ „ein Blick in das Innere“ des zu untersuchenden Materials möglich ist; neben zweidimensionaler Bildgebung sind auch dreidimensionale Aufnahmen möglich [56, 66]. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass es sich hier um ein zerstörungsfreies Verfahren handelt, d.h. nach erfolgter Untersuchung ist es möglich, an der gleichen Probe noch weitere Untersuchungen vorzunehmen [57].

Schwankungen der chemisch-physikalischen Beschaffenheit aufgrund Inhomogenitäten eines Prüfkörpers und damit auch eine mögliche Auswirkung auf Untersuchungsergebnisse werden somit weitestgehend ausgeschlossen.

Seit Einführung des Verfahrens um 1930 wurde dieses immer weiter verfeinert und weiterentwickelt, insbesondere seit der Einführung bildgebender Techniken wie beispielsweise bildgebender Detektoren [58].

Besondere Vorteile des Verfahrens liegen in der der besseren Durchdringung des Prüfkörpers, der höheren räumlichen Auflösung, der Möglichkeit der dreidimensionalen Darstellung (Tomografie) wie auch in der Erfassung zeitabhängiger Vorgänge [57].

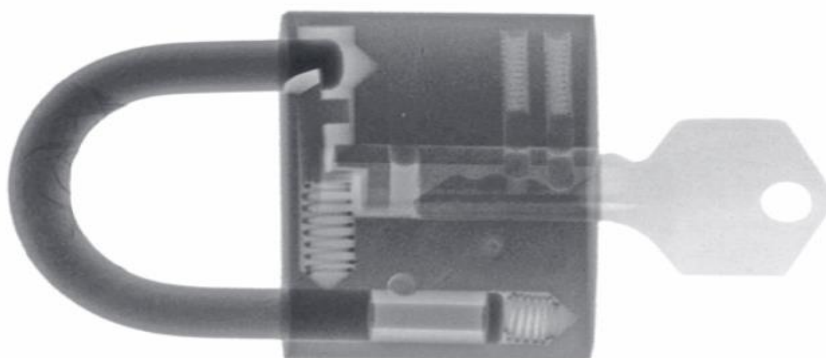


Bild 16: Darstellung von Metallteilen mittels Neutronenradiografie [59].

Besonders geeignet ist diese Untersuchungsmethode zur Darstellung von wasserstoffhaltigen oder organischen Werkstoffen, wie beispielsweise die in den vorgenannten IM vorkommenden Stoffgruppen der Silane und Siloxane. Selbst kleine Wassermengen führen zu einer starken Streuung und sind daher leicht nachweisbar [60].

Neben der vorgenannten Werkstoffprüfung tragen verschiedene Anwendungsbereiche von Untersuchungen mit Neutronen vielfach zu neuen Erkenntnissen bei, wie beispielsweise nachfolgende Themen [61]:

- Energiespeicherung/-transport-/umwandlung
- Medizin (Forschung, Therapie)
- Umwelt (Erkundungen, „clean technologies“)
- Kunst und Kulturerbe (Archäolog. Erkundungen, Zusammensetzung von Artefakten)
- Physik (Entstehung des Universums)

Untersuchungen mittels Neutron Imaging werden, da es sich um kernphysikalische Untersuchungen handelt, in Forschungsreaktoren durchgeführt.

3.5.2 Abgrenzung zur Röntgenstrahlung

Ebenso wie die vorgestellte Neutronenradiografie sind auch Untersuchungen mittels Röntgenstrahlen geeignet, Werkstoffprüfungen durchzuführen.

Jedoch weisen Röntgenstrahlen eine geringere Durchdringung von bestimmten Materialien als Neutronen auf und können nur einen schwachen Kontrast bei Elementen wie beispielsweise Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff hervorbringen [62]. Dies ist dahingehend begründet, dass Röntgenstrahlen vor allem mit der Elektronenhülle eines Atoms wechselwirken [59, 60] und damit die Wahrscheinlichkeit der Reaktion zwischen Röntgenstrahlung mit denjenigen Atomen steigen, je mehr Elektronen dieses aufweist [59].

Folgendes Bild stellt die Unterschiede nochmals bildhaft dar:

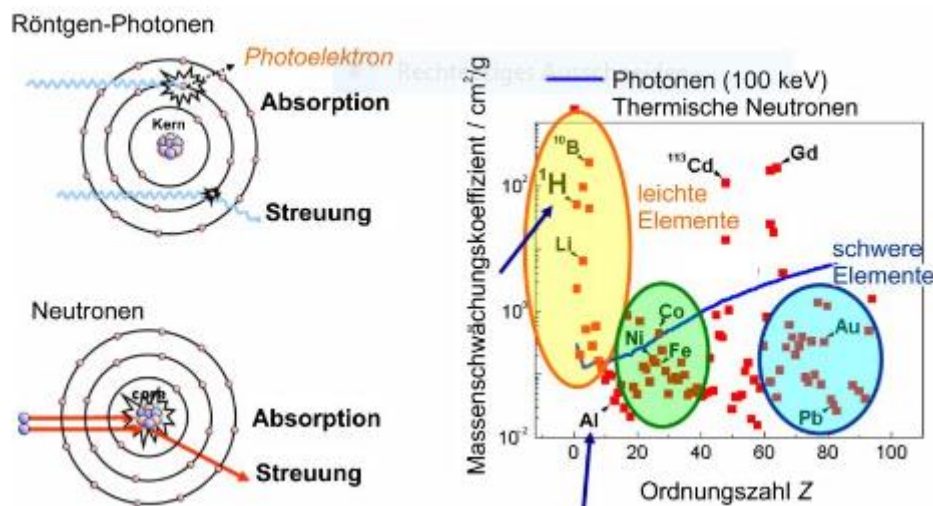


Bild 17: Unterschied Röntgen- und Neutronenstrahlung [80]

Röntgenstrahlung wird demnach umso stärker abgeschwächt, umso mehr Elektronen das Atom besitzt. Wie aus nachfolgendem Bild [18] gut erkennbar ist, ist die Wechselwirkung von Röntgenstrahlen umso größer, je größer das Atom ist und je mehr Elektronen es in der Elektronenhülle besitzt. Umgekehrt hierzu ist die Wechselwirkung zwischen den Neutronen und dem Atomkern von Wasserstoff am größten; eine Zunahme der Wechselwirkung mit zunehmender Kernladungszahl wie hinsichtlich der Röntgenstrahlung ist jedoch bei den Neutronen nicht gegeben.

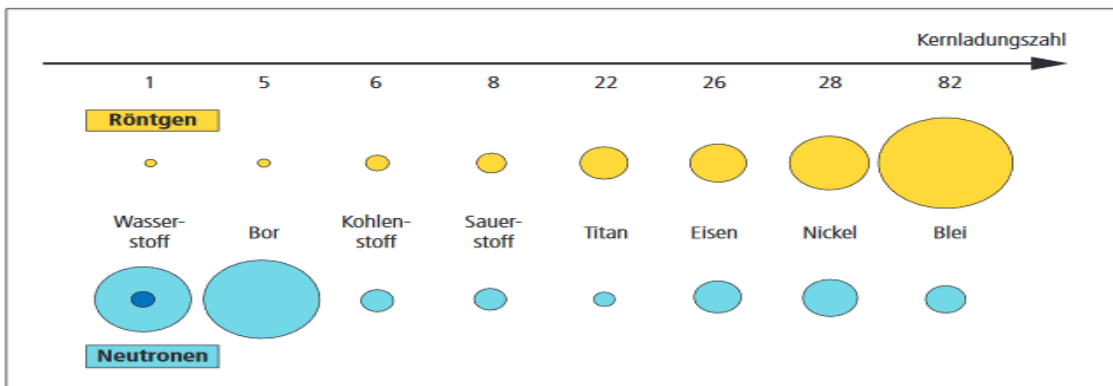


Bild 18: Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung zwischen Röntgen- oder Neutronenstrahlung in Abhängigkeit von der Atomgröße [59].

Beide Verfahren sind daher nicht als konkurrierend, sondern vielmehr als komplementär zu sehen.

Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit von Neutronen, welche durch Kernspaltung generiert werden, ist bei dem vorgestellten Verfahren eine Untersuchung nur in entsprechenden Einrichtungen wie Reaktoren möglich. Zudem sind aufgrund der vorhandenen Radioaktivität besondere Anforderungen hinsichtlich des Strahlenschutzes zu beachten.

3.5.3 Grundlagen

Neutronen, auch mit dem Formelzeichen n bezeichnet, sind ebenso wie die positiv geladenen Protonen Bestandteile der Materie [61] und bilden zusammen mit diesem den Atomkern (mit Ausnahme von Wasserstoff H); gemeinsam werden sie auch als Nukleonen bezeichnet.

Grundsätzlich sind Neutronen ungeladen, sie sind folglich neutral und weisen jedoch Wellenlängen und Energien auf, die atomaren Abständen und charakteristischen Energien im Festkörper entsprechen [61, 62]. Für zerstörungsfreie Untersuchungen hinsichtlich der Werkstoffprüfung besteht daher eine besondere Eignung, da im Vergleich zu den ebenfalls im Atomkern enthaltenen Protonen eine Interaktion nur mit sehr wenigen Materialien stattfindet [57].

Zudem interagieren Neutronen aufgrund der nicht vorhandenen Ladung nicht mit den Elektronen eines Atoms, sondern mit dessen Kern. Diese Art der Reaktion ermöglicht es den Neutronen, möglichst tief in den zu untersuchenden Prüfkörper einzudringen und zudem die Untersuchung größerer Prüfkörper [61]. Neutronen haben außerdem den Vorteil, auf Isotope von Elementen unterschiedlich zu reagieren, wodurch auch komplexe Umgebungen darstellbar sind. Die Ursachen liegen hierfür in der unterschiedlichen Masse des Atomkerns der Isotope begründet sowie in der bereits erwähnten Interaktion der Neutronen mit Atomkernen [61, 62].

Sofern Neutronen im Atomkern gebunden sind, ist dies mit einer unbegrenzten Lebensdauer verbunden; sind sie jedoch „frei“, gelten sie als instabil und nach etwa 15 Minuten tritt ein Zerfall in ein Proton und ein Anti-Neutrino ein [61].

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Arten von Neutronen, welche je nach Energie und Wellenlänge unterschiedlich mit dem Atomkern des zu untersuchenden Prüfkörpers reagieren und demzufolge zu unterschiedlichen Kontrasten der Aufnahmen führen.

Unterschieden werden hierbei kalte (langsame), thermische und heiße (schnelle) Neutronen; thermische Neutronen werden dabei oftmals von Forschungsreaktoren erzeugt.

Eine Einteilung der Neutronen kann nach [62] wie folgt dargestellt werden:

Tab. 3: Einteilung von Neutronen

Quelle	Energie E (meV)	Temperatur T (K)	Wellenlänge λ (Å)
kalt	0,1-10	10-120	30-3
thermisch	10-100	120-1000	4-1
heiß	100-1000	1000-6000	1-0,2

Nachfolgend soll kurz auf die unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Materie eingegangen werden, aufgrund der Reaktion mit Atomkernen von Materie sind folgende Wechselwirkungen möglich:

- elastische Stöße (Streuung) zwischen Neutronen und Atomkern
- unelastische Stöße (Streuung) zwischen Neutron und Atomkern
- Absorption mit Emission
- Absorption mit Kernspaltung, z.B. bei ^{235}U
- Mehrteilchenprozesse mit Spallation (Zersplitterung)

Die Interaktion findet mit den meisten Materialien nur relativ schwach statt, bei einigen chemischen Elementen ist jedoch eine starke Wechselwirkung bekannt, wie beispielsweise mit Wasserstoff H [57].

3.5.4 Grundprinzip des Messverfahrens

Da Neutronen ungeladen sind, reagieren sie nicht mit Elektronen, die jeden Atomkern umgeben, sondern mit dem Atomkern des Materials, auf den sie treffen.

Wie bereits erwähnt, können als Folge hiervon Neutronen absorbiert werden (Abschirmung/Detektion) oder auch keine Reaktion hervorrufen (Durchsichtigkeit von Blei und Aluminium) oder aber durch das Vorhandensein von wasserstoffhaltigen Substanzen abgelenkt werden, was auch als Streuung bezeichnet wird [59].

Für das vorgestellte Verfahren werden die benötigten Neutronen wie bereits erwähnt durch Kernreaktion freigesetzt, bei den gegenständlichen Untersuchungen durch Spaltung von $^{235}\text{Uran}$ im Forschungsreaktor Budapest (neutroneninduzierte Spaltung).

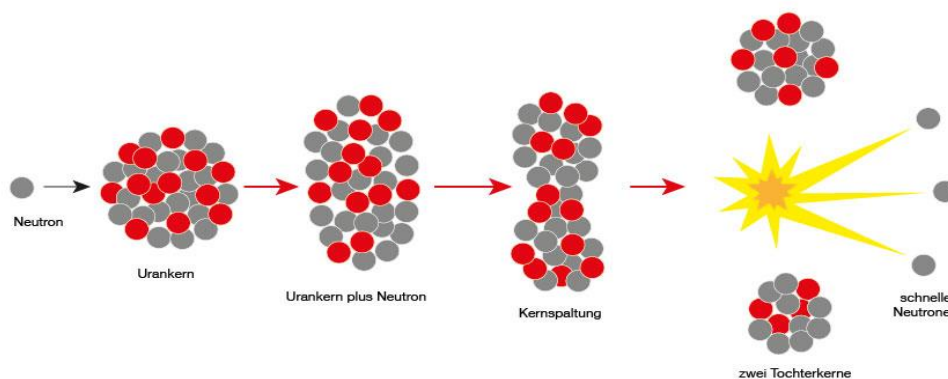


Bild 19: Prinzip der neutroneninduzierten Kernspaltung [Quelle: Homepage Heinz Maier-Leibnitz Zentrum MLZ, Garching/München]

Die nunmehr freigesetzten Neutronen werden durch einen sogenannten Kollimator geleitet, wodurch ein paralleler Strahlenverlauf erzeugt wird, der nachfolgend auf das zu untersuchende Objekt trifft.

Die Probe selbst befindet sich hierbei auf einem justierbaren drehbaren Probenteller, anhand dessen entweder der gesamte Prüfkörper oder auch einzelne Bereiche eines größeren Prüfkörpers hinsichtlich des auftreffenden Neutronenstrahls ausgerichtet werden kann. Die nach Durchgang durch das Untersuchungsobjekt mehr oder weniger abgeschwächte Strahlung trifft nun auf den Detektor (bestehend aus Filmen, Halbleitern oder Neutronenzählrohren), wodurch eine zweidimensionale Darstellung der Strahlung abgebildet wird. Anzumerken bleibt, dass für eine optimale Bildqualität eine möglichst starke Strahlenquelle benötigt wird [59].

Folgende Abbildung veranschaulicht den vorgenannten Messvorgang:

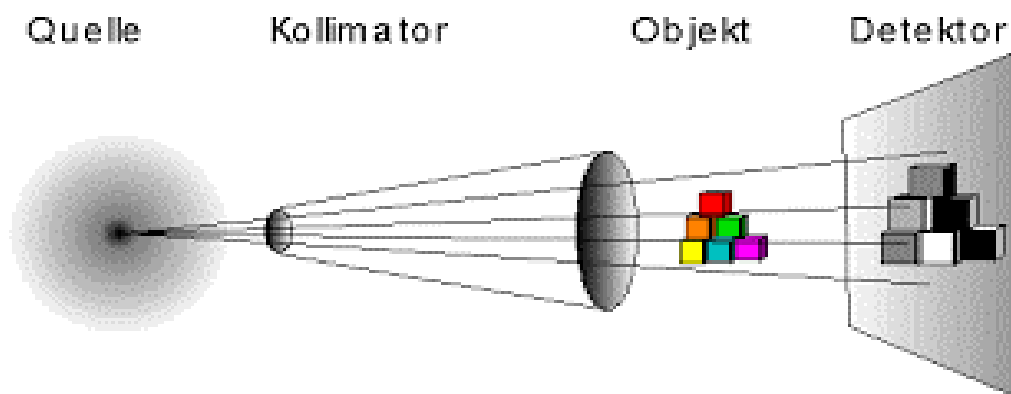


Bild 20: Darstellung des Messvorganges, Quelle: sni-portal.de

Entgegen anderer Messverfahren ist kein Abgleich der erhaltenen Werte mit Datenbanken möglich, sondern im Zuge des Messvorganges erfolgt ein Abgleich der erhaltenen Werte anhand einer vorgenommenen Kalibrierung. Diese wird durch eine Messung ohne Prüfkörper (open beam) bzw. durch Bildaufnahme ohne Beteiligung eines Neutronenstrahls (dark beam) vorgenommen.

Nach erfasster Bildgebung müssen die im Vorfeld erzeugten Neutronen wieder entschleunigt werden; da Neutronen wie bereits erwähnt mit Wasserstoff agieren und durch den Kontakt mit den enthaltenen Protonen abgeschwächt werden („scattering“), ist der Versuchsaufbau mit wassergefüllten Tanks und/oder Paraffinblöcken umgeben.

Die Abschwächung der Intensität der Neutronenstrahlung beim Durchgang durch den zu untersuchenden Prüfkörper in Abhängigkeit von der Schichtdicke und der Konzentration der absorbierenden Substanz wird dabei durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben [63].

$$E_{\lambda} = \log_{10} \frac{I_0}{I_1} = \varepsilon_{\lambda} c d \quad (3)$$

mit folgenden Abkürzungen:

- E Extinktion (Absorbanz), dimensionslos
- I_0 Intensität der eingestrahlten Strahlung (W/m^2)
- I_1 Intensität der transmittierten Strahlung (W/m^2)
- c Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz (mol/l)
- ε_{λ} dekadischer Extinktionskoeffizient bei Wellenlänge λ (spezifische Größe für die absorbierende Substanz)
- d Schichtdicke des durchstrahlten Körpers (m)

Damit ist es möglich, anhand der ermittelten Schwächung der Strahlung nach Durchgang durch den Prüfkörper auf die Stoffmengenkonzentration c zu schließen.

Bezogen auf die hier vorgestellten Untersuchungen ist aufgrund der Schwächung des nach Durchgang durch den Prüfkörper gemessenen Neutronenstrahls eine Konzentration der vorhandenen Wasserstoff-Protonen des IM ermittelbar. Dies wird anhand sogenannter Grauwerte dargestellt, denen je nach entsprechendem Wert auch eine farbliche Entsprechung zugeordnet werden kann.

3.5.5 Bildgebende Darstellung mittels kernphysikalischer Untersuchungen

Wie bereits vorab erwähnt, gibt es hinsichtlich der Wechselwirkung von Atomen mit Röntgenstrahlen oder Neutronen erhebliche Unterschiede. Dadurch, dass die Wechselwirkung mit dem Atomkern (Neutronen) oder mit den Elektronen der Atomhülle erfolgt (Röntgenstrahlung) [59], ist aufgrund der nachfolgenden differierenden Streuung auch mit unterschiedlichen Ergebnissen zu rechnen.

Neben einer üblichen fotografischen Aufnahme eines Prüfkörpers, welche zweidimensional erfolgt, ist auch die bildgebende Darstellung von Untersuchungsergebnissen, welche mittels Neutronenradiografie erhalten werden, ebenso zweidimensional. Durch die Möglichkeit, den Probenteller während der kernphysikalischen Aufnahmen rotieren zu lassen und in kurzen Zeitintervallen Radiografien aufzunehmen, kann nach Durchlaufen einer Rotation von 360° des Probentellers aus den vielen Einzelaufnahmen ein dreidimensionales Bild, die Neutronentomografie, erzeugt werden.

Bildgebende Darstellungen anhand Röntgenstrahlung sind ebenfalls dreidimensional, jedoch wird aufgrund der Streuung an anderen Atombestandteilen demzufolge auch ein anderes Bild erzeugt.

Das nachfolgende Bild stellt die vorgenannten Ausführungen nochmals kurz dar [59].

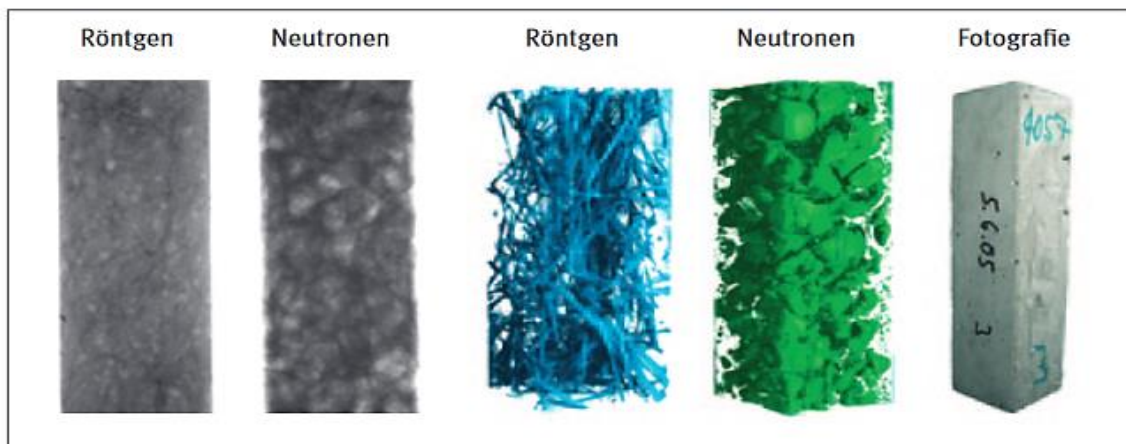


Bild 21: Darstellungsmöglichkeiten verschiedener Untersuchungsmethoden mittels Neutronen- und Röntgenstrahlung [59].

Ganz rechts ist der zu untersuchende Prüfkörper dargestellt, hierbei handelt es sich um einen bewehrten Betonquader.

Die beiden Radiografien links stellen zweidimensionale Aufnahmen dar, während mittels Röntgen- und Neutronenuntersuchungen dreidimensionale Aufnahmen möglich sind. Dadurch, dass die Streuung an unterschiedlichen Bestandteilen des Atoms stattfindet, erfolgt jedoch eine unterschiedliche bildhafte Darstellung. Bei dem obigen Beispiel handelt es sich um einen Betonquader mit Armierung (eisenhaltiger Bewehrung).

Mittels Röntgentechnik kann die eisenhaltige Bewehrung dargestellt werden (Abbildung Mitte), während anhand Neutronentomografie wasserstoffhaltige Bestandteile des Betons erfasst werden können (grüne Abbildung) [59].

Die beiden vorgenannten Verfahren mittels Röntgen- und Neutronenstrahlung sind daher – wie erwähnt – durchaus als komplementär zu sehen und können in Ergänzung wertvolle Hinweise auf die innere Struktur von Prüfkörpern liefern. Der jeweilige Einsatz ist jedoch abhängig von der jeweiligen Fragestellung der Untersuchungen sowie dem zu untersuchenden Material.

3.5.6 Forschungsreaktor BNC

Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse wurden im Zeitraum März bis September 2018 im Forschungsreaktor Budapest am BNC Budapest Neutron Centre durchgeführt.

Bei dem gegenständlichen Reaktor handelt es sich um einen sogenannten Schwimmbadreaktor; bei dieser Art Forschungsreaktor ist der Reaktorkern in einem mehreren Meter tiefen, nach oben offenen Wasserbecken lokalisiert. Das vorhandene Wasser dient hierbei zur Kühlung und bei Nichtbetrieb auch zur Abschirmung gegen Strahlung.

Seit 1992 ist dieser Reaktor mit niedrigem Neutronenfluss ($n_{th} \leq 10^{14} n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in Betrieb und hierbei weist eine Leistung von 10 MW auf, während als Quelle thermische Neutronen Verwendung finden [62]; daneben werden auch kalte Neutronen für Untersuchungen angewandt.

Von den vorhandenen Im Jahre 2014 wurde die Anlage um die Option der digitalen Bildaufnahmen wie auch die Möglichkeit erweitert, Tomografien aufzunehmen [64].

Nachfolgend ist der Aufbau der Anlage dargestellt, anhand derer die nachfolgenden Ergebnisse gewonnen wurden.

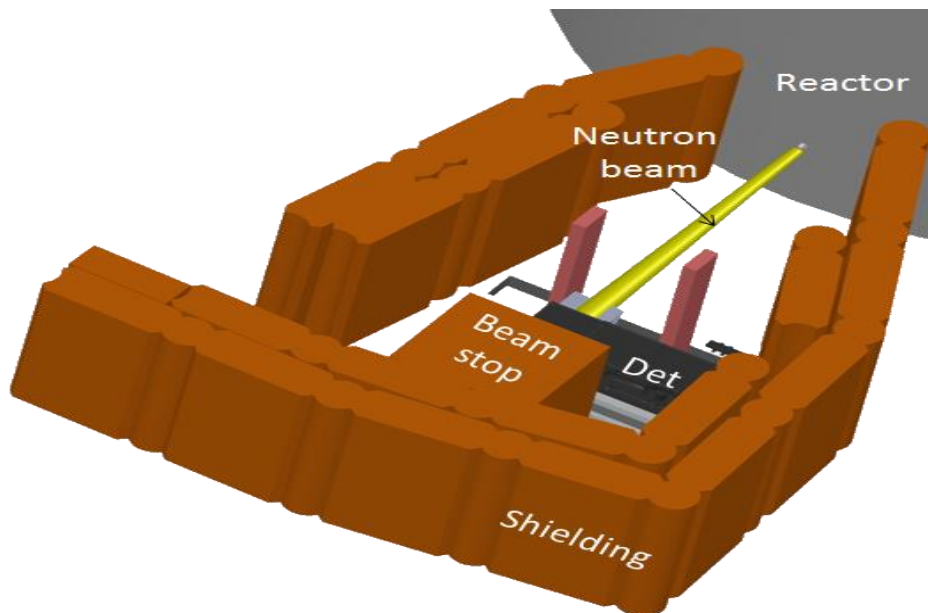


Bild 22: Anordnung Untersuchung Radiographie Forschungsreaktor Budapest [81]) Aus dem Reaktor trifft der Neutronenstrahl (Neutron beam) auf den Prüfkörper, die Messung erfolgt über den Detektor (abgekürzt mit Det).

Aus Strahlenschutzgründen ist der Messaufbau mit wasser-gefüllten Behältern (shielding) umgeben, um die Neutronen „abzubremsen“[81].

Die vorgenannte Anlage (RAD-static/dynamic thermal-neutron imaging station) beinhaltet einen mit Cadmium überzogenen Kollimator für Neutronen, desweiteren besitzt die Anlage zwei Messpositionen entlang des Neutronenstrahls bei einem Strahlungsdurchmesser von ca. 200 mm für dynamische (DNR) und statische (SNR) Aufnahmen.

Die Strahlungsenergieverteilung kann zudem über Strahlungsfiler modifiziert werden, welche aus borhaltigem Kautschuk bestehen. Hinsichtlich der Bildaufnahme besteht die Möglichkeit, sowohl 2D- als auch 3D-Aufnahmen darzustellen, zudem stehen drei verschiedene optische Systeme zur Auswahl [81].

Die Aufnahmezeiten für eine einzige Radiografie-Aufnahme betragen zwischen einer Sekunde und 35 Sekunden; für eine dreidimensionale Tomografie werden zwischen 601 und 1001 Aufnahmen erzeugt und müssen anschließend via Software zu einer einzigen Aufnahme zusammengefügt werden. Hinsichtlich der nachfolgend vorgestellten Ergebnisse wurde hierzu die Software Fiji sowie VG Studio (Volumegraphics) verwendet.



Bild 23: Digitales Aufnahmemodul der Versuchseinrichtung. Im Hintergrund sichtbar sind hellbeige Paraffinblöcke, welche zum „Abbremsen“ der Neutronen benötigt werden [81].



Bild 24: Drehbarer Probenhalter [81]. Durch jeweiliges Drehen des Probenhalters um wenige Grad mit nachfolgender Aufnahme können nach vollständigem Durchlaufen die erhaltenen Aufnahmen zu einer Tomografie „zusammengefügt“ werden.

3.5.7 Untersuchte Prüfkörper

Grundsätzlich ist bei der Anwendung einer nachträglichen Horizontabdichtung am Mauerwerk von einem Ziegel-Mörtel-Verbund auszugehen, d.h. zwischen Lagen aus Ziegeln, welche mittels Stoßfugen vertikal vermauert sind, sind zwischen den einzelnen Ziegellagen horizontale Lagerfugen (ca. 10mm) aus Mörtel vorhanden.

Da sich in entsprechenden Voruntersuchungen der Baustoff Ziegel als das Haupt-Transportmedium für das applizierte IM herausgestellt hat, wurde die Durchführung der vorgenannten kernphysikalischen Untersuchungen ausschließlich am Baustoff Ziegel vorgenommen.



Bild 25: Probenvorbereitung zum Spalten der Prüfkörper. Erkennbar ist an der Oberseite eine Nut, welche vorab mit einem Winkelschleifer zum leichteren Spalten angebracht wurde.



Bild 26: Durch Spalten abgetrenntes Probestück

Voruntersuchungen am Baustoff Mörtel ließen auf einen eher reduzierten IM-Transport schließen.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass es aufgrund Alterungsvorgängen und damit der Änderung der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Baustoffes zu einem teilweisen Transport von IM führen kann.

4 Versuchsordnung und Durchführung

4.1 Injektionsmittel-Applikation von Mauerwerksbaustoffen

4.1.1 Allgemeines

Grundlage der durchgeführten Untersuchungen bildete die Prüfvorschrift 02/2012 des Dahlberg-Institutes Wismar [18, 19]. Da sich die Vorschrift auf Verbundproben aus Ziegel und Mörtel bezieht und es sich bei den nachfolgend vorgestellten Prüfkörpern um Einzelprüfkörper handelt, wurde diese dahingehend leicht modifiziert.

Eine Durchführung an Einzelprüfkörpern erfolgte auch aus dem bereits genannten Grund, dass gemäß Voruntersuchungen davon ausgegangen wurde, dass der Baustoff Mörtel weniger dazu neigt, das entsprechende IM ausreichend weit zu transportieren; diese These sollte anhand der vorgestellten Untersuchungen verifiziert werden bzw. mögliche Ursachen hierfür ermittelt werden.

Basis der nachfolgend vorgestellten Ergebnisse sind durchgeführte Studien an der Hochschule Wismar [11], deren Ziel experimentelle Untersuchungen zur Injektionsmittelausbreitung in mineralischen, kapillarporösen Baustoffen beinhaltete.

Verschiedene Mauerwerksbaustoffe, wie sie auch in historischen Gebäuden zu finden sind, wie beispielsweise Ziegel und Klinker, jedoch aus Kalksandsteine sowie Kalk-Zement-Mörtel wurden mit verschiedenen klassischen IM wie auch den seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlichen IM-Cremes behandelt. Die Proben wurden entweder selbst hergestellt (Mörtel) oder im Baustoffhandel erworben. Die Herstellung der entsprechenden Prüfkörper erfolgte durch Werk trockenmörtel, welcher mit Wasser nach Herstellerangaben angemischt wurde und dann in vorbereitete Schalungen zum Aushärten verfüllt wurde.



Bild 27: Herstellung von Mörtelprüfkörpern. Nach Anmischen des Werk trockenmörtels wurde dieser in entsprechende Schalungen zum Abbinden verfüllt. Die entsprechende Nummerierung der Prüfkörper wurde bereits vor dem Einfüllen „eingearbeitet“ [11]

Von einer Verwendung von Werkfrischmörtel wurde Abstand genommen, da diesem oftmals werkseitig Luftporenbildner zur besseren Verarbeitbarkeit zugesetzt werden; hierdurch ist jedoch eine Beeinträchtigung der vorhandenen Porenstruktur des Baustoffes gegeben, was sich auf die vorgenommenen Untersuchungen negativ ausgewirkt hätte. Die Ausführung der IM-Applikation erfolgte entsprechend der Angaben der jeweiligen Hersteller.

4.1.2 Vorbereitende Maßnahmen

Im Vorfeld der vorzunehmenden Untersuchungen sind die Prüfkörper bis zur Massenkonstanz zu trocknen (darren). Bei mineralischen Baustoffen sind Temperaturen bis +105° C möglich, da bis zu diesem Temperaturbereich keine Strukturveränderungen zu erwarten sind.

Nach Abschluss des Darrens sind die Prüfkörper einzuhausen (Folie etc.), um eine Feuchteaufnahme durch den Wassergehalt der Umgebungsluft auszuschließen.

Es empfiehlt sich aufgrund der Einzelprüfkörper zudem, die Prüfkörper während der Untersuchungen eingehaust zu lassen und lediglich im Bereich des Bohrloches eine Aussparung zu schaffen.

Das anzubringende Bohrloch mit den entsprechenden Parametern wie Neigung oder Bohrlochdurchmesser ist nach Herstellerangaben auszuführen und nach Erstellung mit ölfreier Druckluft auszublasen, um ggf. eine überflüssige Aufnahme von IM durch Bohrmehl zu vermeiden und einen ungehinderten Transport in das Porensystem zu gewährleisten.



Bild 28. : Herstellen des Bohrloches nach Angaben des Herstellers. Zur Optimierung der Bohrung ist der Prüfkörper mittels Schraubzwingen fixiert. Anschließend ist zur Vermeidung des Verbleibens von Bohrmehl das Bohrloch mit ölfreier Druckluft auszublasen.

4.1.3 Sättigungsfeuchte

Die maximale Sättigung eines Baustoffes mit Wasser wird auch als Sättigungsfeuchte bezeichnet. Hierzu werden die Prüfkörper vollumfänglich in ein Gefäß mit Wasser gelegt und in bestimmten Zeitabständen gewogen. Nach Einstellung einer Massenkonstanz, d.h. wenn keine Gewichtszunahme messtechnisch zu erfassen ist, ist davon auszugehen, dass der Porenraum des Baustoffes „ausgefüllt“ ist. Die Sättigung erfolgt demzufolge ohne äußere Druckeinwirkung und ist unabhängig von vorgegebenen Zeitintervallen zu verifizieren.

Die Berechnung der Sättigungsfeuchte in (m-%) erfolgte dabei folgendermaßen:

$$u_s = \frac{m_s - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100\% \quad (4)$$

mit folgenden Abkürzungen:

m_s Masse des gesättigten Prüfkörpers (kg)

m_{tr} Masse des trockenen Prüfkörpers (nach Darren, in kg)

4.1.4 Einstellung des Durchfeuchtungsgrades D(g)

Um eine Aussage hinsichtlich der IM-Aufnahme von Prüfkörpern zu bekommen und gleichzeitig einen Bezug zur Baupraxis zu schaffen, ist es notwendig, die IM-Aufnahme der Prüfkörper bei verschiedenen Durchfeuchtungsgraden zu ermitteln; hierzu ist es erforderlich, die Prüfkörper auf bestimmte Durchfeuchtungsgrade einzustellen.

Grundsätzlich eignen sich hierzu diejenigen Durchfeuchtungsgrade, die auch bei einer Anwendung am Bauwerk anzutreffen wären, also zwischen 40% und 100%.

Um festzustellen, wieviel IM bei einem gedarrten Baustoff aufgenommen werden kann, bei dem der maximal mögliche Porenraum zur Verfügung steht, bietet sich zudem auch die Untersuchung bei D(g) 0% an.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, den gewünschten Durchfeuchtungsgrad im Baustoff einzustellen; ausschlaggebend ist die Massendifferenz zwischen gesättigtem und gedarrtem Prüfkörper:

- Getrockneter Prüfkörper
Die Wasserzugabe ist prozentual aus der Differenz zwischen getrocknetem und gesättigtem Baustoff zu ermitteln und dem Prüfkörper zuzugeben; eine Kontrolle ist durch Wägung vorzunehmen. Nach Zugabe der entsprechenden Wassermenge sind die Prüfkörper einzuhaufen und für ca. vier Wochen zu lagern, um eine homogene Verteilung der Feuchtigkeit sicherzustellen.
- Gesättigter Prüfkörper
Die Einstellung des D(g) erfolgt hierbei durch Rücktrocknung, d.h. der gesättigte Prüfkörper wird der Raumluft exponiert bzw. einer gemäßigten Wärmequelle ausgesetzt. Nach Erreichen der ermittelten Masse sind die Proben ebenfalls einzuhaufen.

Die Berechnung des Durchfeuchtungsgrades D(g) wurde dabei wie folgt vorgenommen

$$D_{(g)} = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100\% \quad (5)$$

mit folgenden Abkürzungen:

u_a aktueller Feuchtegehalt (m.-%)

u_s Sättigungsfeuchte (m.-%)

4.1.5 Applikation des Injektionsmittels (IM)

Hinsichtlich der Applikation eines IM liegen im Regelfall Anweisungen des Herstellers vor, welche in jedem Fall zu berücksichtigen sind; ausgenommen hiervon ist der Bohrlochabstand, der an Einzelprüfkörpern nicht berücksichtigt werden kann.

Unabhängig, ob die Applikation im Kartuschen-, Saugwinkel- oder auch im Spritzenverfahren bei cremeförmigen IM erfolgt, sind die Prüfkörper anschließend einzuhausen, ggf. ist eine Wartezeit zu berücksichtigen, bis beispielsweise eine chemische Reaktion des IM nach Applikation abgeschlossen ist.



Bild 29: Applikation von IM in Ziegelprüfkörper im Kartuschen (IM farblos) und im Saugwinkelverfahren (IM rot)



Bild 30: IM-Applikation von Mörtelprüfkörpern mittels Kartuschenverfahren [11]

Aufgrund der im Vergleich zur üblichen Anwendung geänderten Größe des zu hydrophobierenden Baustoffes ist ggf. mit dem Hersteller eine verkürzte Applikationsdauer abzustimmen.

4.1.6 Spalten der Prüfkörper

Zur Vorbereitung des nachfolgend durchzuführenden Tropfenaufsetztestes sind die Prüfkörper zu spalten, optimalerweise quer im Bereich des Bohrloches. Es ist darauf zu achten, dass die entstehende Bruchfläche möglichst eben ist.

Ein Spalten der Prüfkörper mittels Hammer und Meißel ist einer Auftrennung mit Winkelschleifer o.ä. vorzuziehen, da aufgrund der entstehenden Wärmeentwicklung beim elektrischen Schneiden die Möglichkeit des „Verschmierens“ der vorhandenen Porenstruktur des Baustoffes besteht; ein nachfolgend durchgeführter Tropfenaufsetztest wäre unter diesen Bedingungen unbrauchbar. Grundsätzlich besteht jedoch auch die Möglichkeit, den Prüfkörper durch eine entsprechende apparative Einrichtung mechanisch zu trennen.



Bild 31: Spaltung des Prüfkörpers



Bild 32: Auftrennen von Prüfkörpern mittels apparativer Vorrichtung. Durch Fixierung des Prüfkörpers und Einspannen mittels Zwingen sind nach Aufsetzen eines Hammers relativ gleichmäßige „Scheiben“ abtrennbar [11]

Nach Spalten der Prüfkörper ist eine erste visuelle Einschätzung der IM-Ausbreitung durch Dunkel-
färbung des infiltrierten Bereiches möglich, jedoch durch weitere Verfahren noch zu prüfen.



Bild 33: Visuell erkennbarer durch IM dunkel gefärbter Bereich des Baustoffes nach erfolgter Spaltung

4.1.7 Tropfenaufsetztest

Das Ziel der vorgenannten Abdichtungsmethode ist die Ausbildung eines flächigen, hydrophoben „Abdichtungsspiegels“. Somit soll aufgrund der wasserabweisenden Wirkweise ein weiteres Aufsteigen von Feuchte unterbunden werden.

Unter Laborbedingungen lässt sich nach erfolgter Applikation die durch das IM hervorgerufene Hydrophobie nachweisen, indem auf die durch Spaltung der Prüfkörper entstandene Bruchfläche Wassertröpfchen aufgesetzt werden (z.B. mittels einer Pipette).



Bild 34: Verbleibender Wassertropfen aufgrund hydrophober Eigenschaften des Prüfkörpers nach IM-Applikation

Der Winkel, welcher sich hierbei zwischen dem Wassertropfen und der Oberfläche des Baustoffes bildet, wird als Kontaktwinkel bezeichnet; gleiche Begriffe hierfür sind auch Rand- oder Benetzungswinkel.

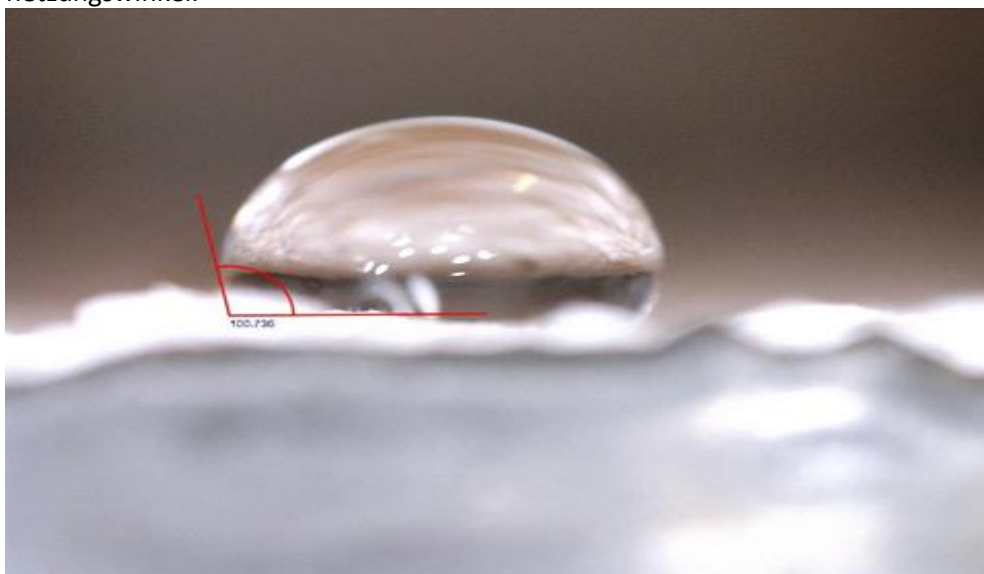


Bild 35: Tropfenaufsetztest [65]. Deutlich erkennbar ist der über 90° vorhandene Randwinkel [65] des Wassertropfens, welcher sich aufgrund des hydrophoben Untergrundes einstellt.

Verbunden mit einer vorhandenen Hydrophobie ist auch die Änderung des Randwinkels des auf-gebrachten Wassertropfens; so ist bei hydrophobem Untergrund der Randwinkel des Wasser-tropfens $>90^\circ$ mit dem nachfolgenden Effekt, dass der Wassertropfen auf der Oberfläche des behandelten Baustoffes bestehen bleibt. Im nicht behandelten Bereich hingegen ist aufgrund des vorhandenen Randwinkels von $<90^\circ$ ein Versiegen des Tropfens mit nachfolgender Weiter-leitung in den Baustoff gegeben.

Nach Aufsetzen des Wassertropfens auf den Baustoff sind hierbei drei Phasen miteinander in Kontakt (fest, flüssig und gasförmig) mit entsprechenden Grenzflächenspannungen.

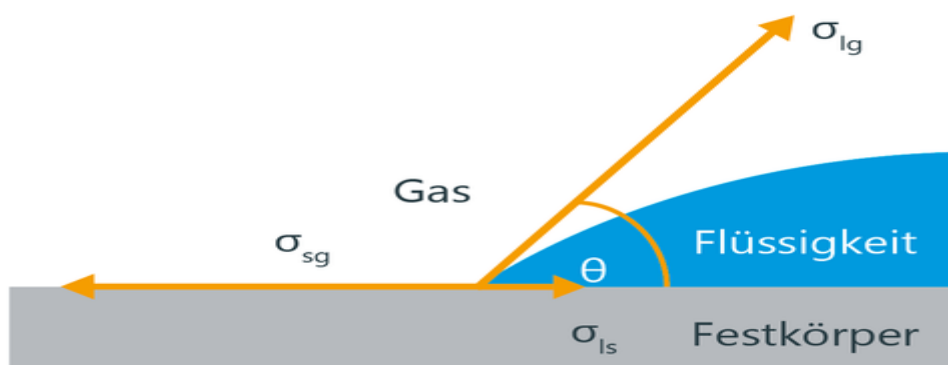


Bild 36: Darstellung zur Berechnung des Kontaktwinkels (Quelle: www.kruss-scientific.com)

Die Berechnung des Kontaktwinkels erfolgt hierbei nach der Young'schen Gleichung und kann somit auch messtechnisch erfasst werden.

Von Thomas Young wurde der Zusammenhang zwischen einer festen Oberfläche und den aus Bild xx ersichtlichen drei Phasen fest, flüssig und gasförmig wie folgt definiert:

$$\sigma_{SG} = \sigma_{SL} + \sigma_{LG} \cos \theta \quad (6)$$

mit folgenden Abkürzungen:

- θ Kontaktwinkel ($^\circ$)
- σ_{SG} Grenzflächenspannung fest und gasförmig (kg/s^2)
- σ_{SL} Grenzflächenspannung fest und flüssig (kg/s^2)
- σ_{LG} Grenzflächenspannung flüssig und gasförmig (kg/s^2)

Grundlage der Formel ist hierbei der festgestellte Zusammenhang zwischen der Oberflächen-energie σ_{SG} eines Festkörpers und der Grenzflächenenergie σ_{LS} eines sich des darauf befindlichen Wassertropfens sowie der Oberflächenspannung σ_L der Flüssigkeit und dem Kontaktwinkel θ :

$$\cos \theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad (7)$$

mit folgenden Abkürzungen:

- θ Kontaktwinkel ($^\circ$)
- σ_L Grenzflächenspannung der Flüssigkeit (kg/s^2)

σ_S	Grenzflächenspannung des Festkörpers (kg/s^2)
σ_{LS}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper (kg/s^2)

4.2 Kernphysikalische Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen waren Erkenntnisse hinsichtlich der Ausbreitung eines IM „im Inneren“ des Prüfkörpers. Zur grundlegenden Darstellung wurden vorab einige Prüfkörper mittels Neutronenradiographie untersucht, um erste Hinweise hinsichtlich einer zweidimensionalen Ausbreitung zu bekommen.

Untersucht wurden Vollziegel Mz NF mit den Abmessungen 240mm x 115mm x 71 mm, welche mit hydrophobierend wirkenden IM verschiedener Hersteller appliziert wurden. Teils sind auch halbierte Prüfkörper untersucht worden, welche zuvor hinsichtlich der Feststellung der visuellen Ausbreitung gespalten wurden.

Eine gesonderte Vorbereitung der Prüfkörper ist nicht erforderlich, da es sich wie bereits erwähnt um ein zerstörungsfreies Verfahren handelt; hinsichtlich des zu untersuchenden Bereiches des Prüfkörpers (Aufnahme von Bereichen oder des gesamten Prüfkörpers) ist die exakte Ausrichtung auf dem Probenteller vorzunehmen, damit der Neutronenstrahl den zu untersuchenden Bereich des Prüfkörpers auch optimal trifft. Die Hauptarbeit bei den gegenständlichen Untersuchungen ist die Vorbereitung/Einrichtung der benötigten Neutronenquelle. Umfangreich sind hierbei die zudem die entsprechenden Nachbereitungen der erhaltenen Ergebnisse mittels entsprechender Software.

Der eigentliche Messvorgang für eine neutronenradiografische Untersuchung dauert wenige Minuten; für die dreidimensionale Darstellung als Neutronentomografie sind viele Einzelaufnahmen nötig, wobei sich der Probenteller um wenige Grad in definierten Zeitabständen dreht. Für die nachfolgend vorgestellten tomografischen Untersuchungen wurden mehrere Stunden veranschlagt.

5 Ergebnisse

5.1 Injektionsmittel-Applikation

Die nachfolgend vorgestellten Studien zur IM-Ausbreitung wurden unabhängig voneinander ausgeführt, dahingehend sind geringe Abweichungen untereinander möglich. In jeder Studie wurden unterschiedliche Baustoffe sowie verschiedene IM verwendet, so dass zu Beginn der Ausführungen jeweils eine kurze Zusammenstellung erfolgt. Dies ist auch dahingehend von Bedeutung, um mögliche materialbedingte Auswirkungen auf die IM-Ausbreitung erfassen zu können.

Neben der Erfassung der Ausbreitung bei verschiedenen Durchfeuchtungsgraden wurde auch die Ausbreitung bei $D(g)$ 0% mitermittelt. Dies würde theoretisch demjenigen Zustand entsprechen, bei dem alle Kapillarporen nicht mit Wasser gefüllt sind und für eine IM-Aufnahme vollumfänglich zur Verfügung ständen.

Die nach Spaltung der Prüfkörper feststellbare Ausbreitung des IM wurde messtechnisch erfasst, nachdem diese mittels Tropfenaufsetztest verifiziert wurde.

Eine grafische Darstellung der erhaltenen Werte und der zugehörigen Durchfeuchtungsgrade $D(g)$ lässt sich gut mittels linearer Regression darstellen.

Dieses statistische Verfahren eignet sich zur Darstellung der Abhängigkeit zwischen einer und einer weiteren oder mehreren Variablen. Der ermittelte Korrelationskoeffizient ist hierbei als Maß für den linearen Zusammenhang zu sehen, während das Bestimmtheitsmaß als Quadrat des Korrelationskoeffizienten Aufschluss über die Streuung der erfassten Daten gibt. Bei einem Wert von 1 des Bestimmtheitsmaßes liegt ein klarer linearer Zusammenhang vor, während bei einem Wert gleich 0 kein linearer Zusammenhang besteht.

Pro eingestelltem Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ wurden aus statistischen Gründen jeweils drei Parallelproben angefertigt, um zum einen die Ergebnisse zu verifizieren und mögliche Ausreißer bei einer nachfolgenden Auswertung unberücksichtigt zu lassen. Für die vorgenannte Darstellung der Ausbreitung mittels linearer Regression wurden auch die Ergebnisse der Parallelproben berücksichtigt. Die jeweils zugehörigen Bilder sind als beispielhaft für die charakteristische IM-Ausbreitung bei der jeweiligen Versuchsanordnung zu betrachten.

5.1.1 Studie 1: Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch I

Tab. 4: Kenndaten Studie 1 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	Kalk-Zement-Mörtel MG II	Rohdichte: 1,70-1,76 g/cm ³ Porosität: 0,16
Injektionsmittel:	Kaliummethyilsilantriolat und -silikat	Wirkprinzip: porenverstopfend, hydrophobierend
Applikation:	Dauer über 16 Tage	drucklos
Umgebungstemperatur:	ca. 12° C	rel. LF nicht erfasst



Bild 37: Ausbreitung IM bei $D(g)$ 0%. Durch die Anfärbung des IM mit einem Farbstoff (Uranin) ist die Ausbreitung anhand der Verfärbung erkennbar [11]



Bild 38: Ausbreitung des IM bei D(g) 40%. Auch im nicht sichtbar gefärbten Bereich ist eine teilweise Hydrophobie durch an der Oberfläche verbleibende Wassertropfen sichtbar. Dieser Bereich ist jedoch nicht durch Verfärbungen gekennzeichnet; offensichtlich findet der Transport von IM und Farbstoff nicht gleichermaßen statt [11]

Zur besseren Darstellung der Ausbreitung des IM wurde dem IM ein fluoreszierender Farbstoff (Uranin) beigefügt. Hinsichtlich der ermittelten Werte der Ausbreitung des IM war bei den gegenständlichen Mörtelproben eine große Streuung erkennbar.

Da sich bereits bei der Herstellung der Mörtelwürfel Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Chargen abzeichneten, kann die Streuung ggf. auf materialbedingte Schwankungen bei der Herstellung des Baustoffes zurückgeführt werden. Bei der nachfolgenden Darstellung wurden die stark abweichenden Werte nicht mitberücksichtigt, die Werte sind somit bereinigt.

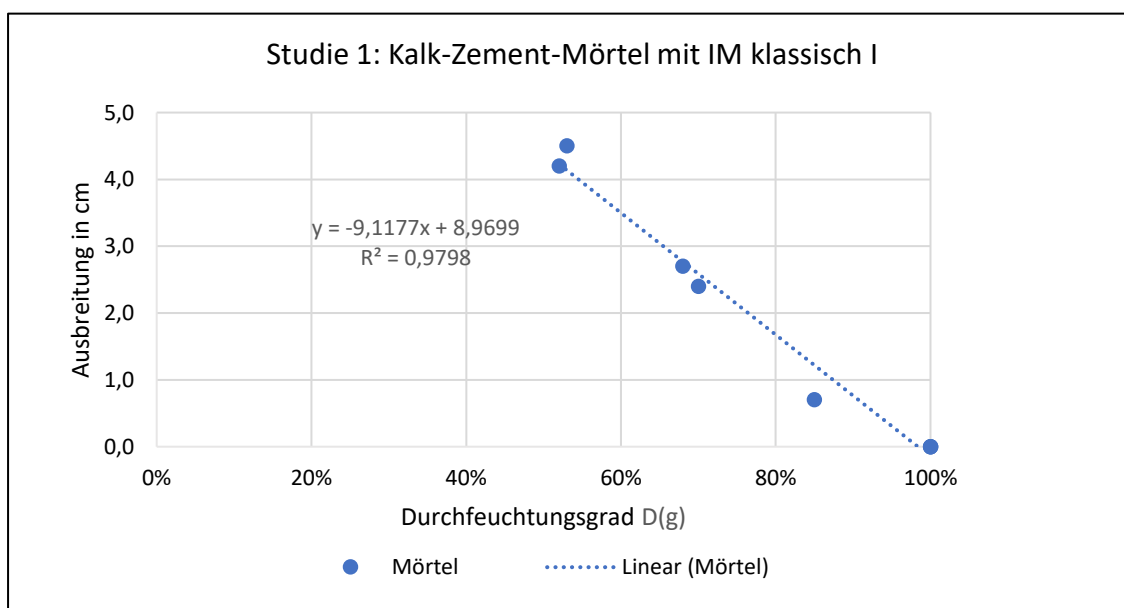


Bild 39: Studie 1, Lineare Regression Mörtel mit IM klassisch I

Erkennbar bleibt eine deutliche Abnahme der IM-Ausbreitung mit zunehmendem D(g), wobei sich der lineare Zusammenhang auch in einem hohen Bestimmtheitsmaß (Wert 0,9798) widerspiegelt. Bei den vorgenannten Proben ist eine maximale Ausbreitung bei D(g) 50% erkennbar, wobei aufgrund der Bereinigung der Werte nicht automatisch auf eine maximale Ausbreitung bei diesem D(g) geschlossen werden kann.

Bei einem D(g) von 100%, bei welchem von einer vollumfänglichen Füllung der Poren mit Feuchtigkeit auszugehen ist, ist keine Aufnahme vom IM mehr zu verzeichnen.

5.1.2 Studie 2: Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch II

Tab. 5: Kenndaten Studie 2 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	(1) Kalk-Zement-Mörtel MG II (2) Kalk-Zement-Mörtel MG II (unterschiedliche Hersteller)	(1) Rohdichte: 1,76 g/cm ³ Porosität 0,2 (2) Rohdichte 1,78 g/cm ³ Porosität 0,15
Injektionsmittel:	Kaliummethyilsilantriolat und -silikat	Wirkprinzip: porenverstopfend, hydrophobierend
Applikation:	(1) Dauer 21 Tage jeweils drucklos	(2) Dauer 14 Tage
Umgebungstemperatur:		(1) 17° C, 28%/40% rel. LF (2) 12° C, rel. LF nicht erfasst

Verwendet wurde für beide Untersuchungsreihen ebenfalls ein Kalk-Zement-Mörtel unterschiedlicher Hersteller, Unterschiede sind in der Applikationsdauer vorgenommen worden. Rein visuell waren bei den Prüfkörpern keine Ausbreitungsgrenzen erkennbar, erst nach Durchführung des Tropfenaufsetztestes waren diese feststellbar, wenn auch in sehr geringem Ausmaß.

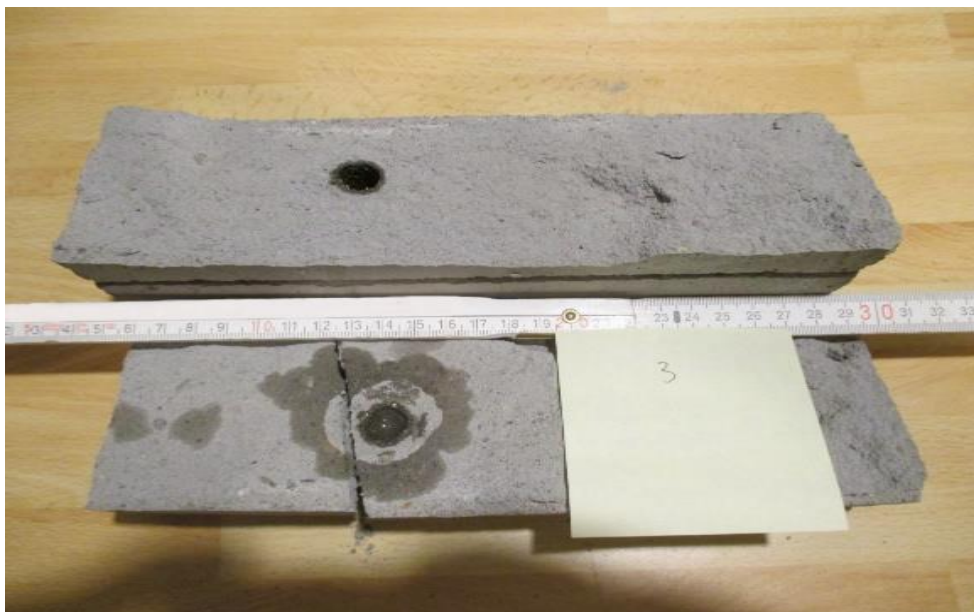


Bild 40: Ausbreitung IM bei D(g) 0%., Hersteller 1. Auch bei potentieller maximaler Aufnahmemöglichkeit des Porensystems für das IM bleibt die Ausbreitung relativ gering [11]



Bild 41: Ausbreitung IM bei D(g) 60%, Hersteller 1. Mit zunehmender Durchfeuchtung des Prüfkörpers findet eine Ausbreitung des IM so gut wie nicht mehr statt [11]



Bild 42: Ausbreitung IM bei D(g) 60%, Hersteller 2. Auch hier außer in unmittelbarer Nähe des Bohrloches kaum eine Ausbreitung feststellbar [11]

Deutlich erkennbar ist eine geringe Ausbreitung des IM, welches sich selbst bei D(g) 0% annähernd nur auf den unmittelbar benachbarten Bereich um das Bohrloch beschränkt. Bei höherer Durchfeuchtung des Baustoffes bei D(g) 40% ist die Ausbreitung nochmals reduziert.

Die festgestellten Ergebnisse lassen jedoch ebenso den Schluss zu, dass mit zunehmender Durchfeuchtung des Baustoffes eine Ausbreitung abnehmend ist. Die gemäß ÖNORM [13] und WTA [16] als zu erreichenden Bohrlochabstände von 10cm lassen sich keineswegs erreichen.

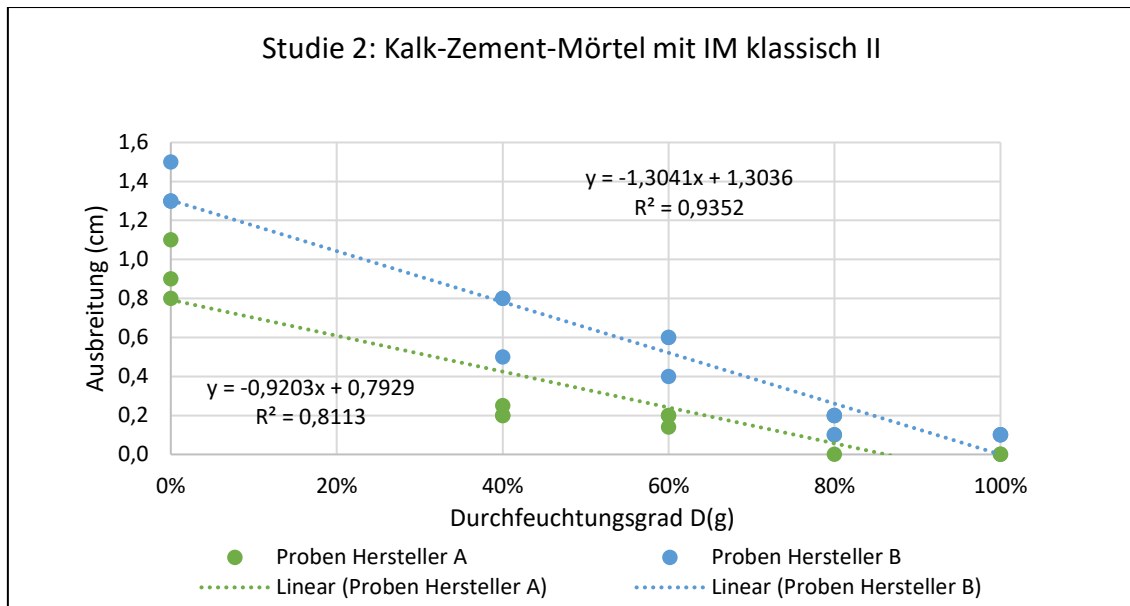


Bild 43: Studie 2, Lineare Regression Mörtel mit IM klassisch II

Anhand der dargestellten linearen Regression ist bei Studie 2 ebenfalls ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Ausbreitung des IM und dem Durchfeuchtungsgrad gegeben.

Zudem ist erkennbar, dass die maximale Ausbreitung (A_{max}) des IM bei einem darr-trockenen Baustoff (D(g) 0%) erfolgt, wenn auch wie in beiden Versuchsreihen erkennbar ist, in sehr geringem Ausmaß.

5.1.3 Studie 3: Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme I

Tab. 6: Kenndaten Studie 3 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	Kalk-Zement-Mörtel MG II (1) Abbindezeit 2 Tage (2) Abbindezeit 28 Tage	Rohdichte: 1,73 g/cm ³ Porosität: 0,12 werkseitig hydrophob
Injektionsmittel:	IM-Creme, Wirkstoffgehalt 80 Gew.-%	Wirkprinzip: hydrophobie- rend
Applikation:	drucklos	
Umgebungstemperatur:	12,6 ° C	71% rel. LF

Bei dem verwendeten Kalk-Zement-Mörtel wurde das IM zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Herstellung appliziert: zum einen nach 2 Tage, also zeitnah nach der Herstellung und zum anderen nach der üblichen Abbindezeit von 28 Tagen. Durch die Zugabe von Wasser zum Werkrockenmörtel beginnt der Zement durch das Wasser zu härten, so dass bei einer Abbindezeit von Tagen davon ausgegangen werden kann, dass dieser Prozess noch andauerte.

Folglich sollte dem zwei Tage alten Mörtel erheblich mehr Feuchtigkeit zur Verfügung gestanden haben als einem Mörtel nach abgeschlossener Erhärtung.



Bild 44 : Ausbreitung IM bei D(g) 80%. Um den Bohrkern herum zeigt sich ein ovaler hydrophober Bereich [11]

Die halbkreisförmige Ausbreitung des IM um das Bohrloch ist nach erfolgtem Tropfenaufsetztest gut zu erkennen.

Gemäß der vorherigen Ausführungen ist ein Verbleiben des Wassertropfens aufgrund des im Baustoff vorhandenen IM sichtbar, da sich der Kontaktwinkel aufgrund der durch das IM vorhandenen Hydrophobie auf $\geq 90^\circ$ geändert hat. Hinsichtlich der erhaltenen Werte der IM-Ausbreitung zeigen sich leicht erhöhte Werte bei dem zwei Tage alten Mörtel.

Die hier vorgestellten Proben wurden nach erfolgter Applikation nicht mechanisch, sondern mittels eines Trennschleifers halbiert. Geringfügige Beeinträchtigungen an den Prüfkörpern durch entstandene Hitze beim Trennen können somit nicht ausgeschlossen werden.

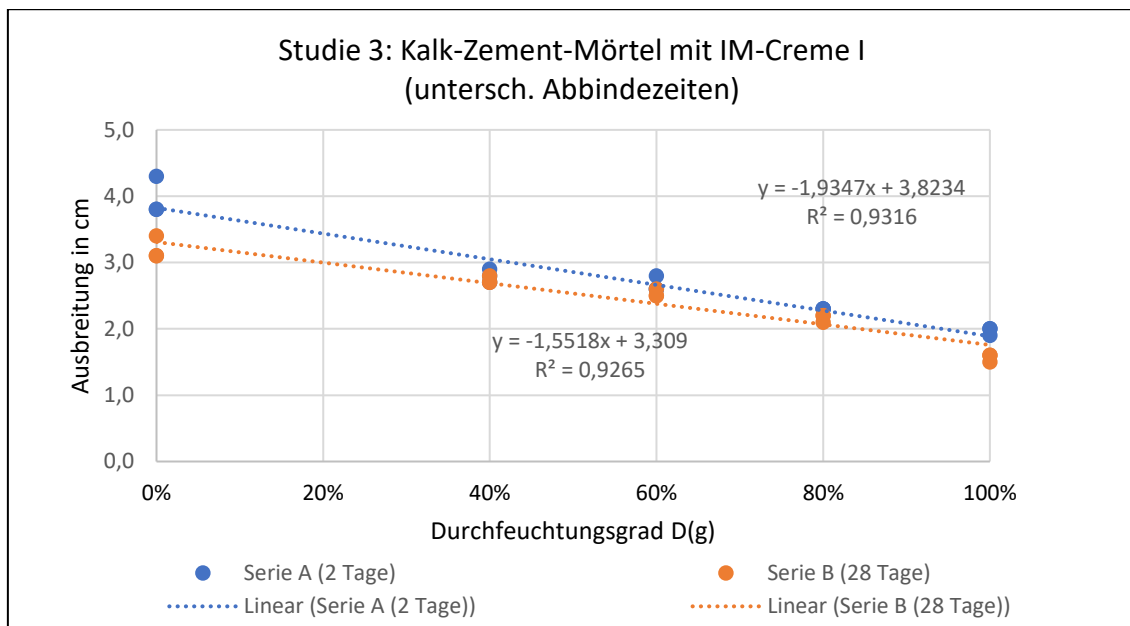


Bild 45: Studie 3, Lineare Regression Mörtel mit IM-Creme I

Die maximale Ausbreitung des IM, selbst im werkseitig hydrophob eingestellten Mörtel, findet bei einem D(g) von 0% statt. Eine „Grundfeuchte“ im Baustoff zum Transport des IM scheint hierbei nicht erforderlich zu sein. Die beiden Geraden der beiden Versuchsreihen verlaufen relativ gleich; die Ausbreitung des zwei Tage alten Mörtels ist hier etwas höher.

Auffallend ist in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass sich selbst bei höchsten Durchfeuchtungsgraden von 100% noch eine Ausbreitung des IM, wenn auch in geringem Maße, feststellen lässt.

5.1.4 Studie 4: Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme II

Tab. 7: Kenndaten Studie 4 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	Kalk-Zement-Mörtel MG II	Rohdichte: 1,6 g/cm ³ Porosität: 0,15 werkseitig hydrophob
Injektionsmittel:	IM-Creme, Wirkstoffgehalt 85%	Wirkprinzip: hydrophobierend
Applikation:	drucklos	
Umgebungstemperatur:	17° C	rel. LF nicht erfasst

Bei den untersuchten Proben zeigte sich ebenfalls eine sehr geringe Ausbreitung des IM, auch bei einem D(g) von 0%.

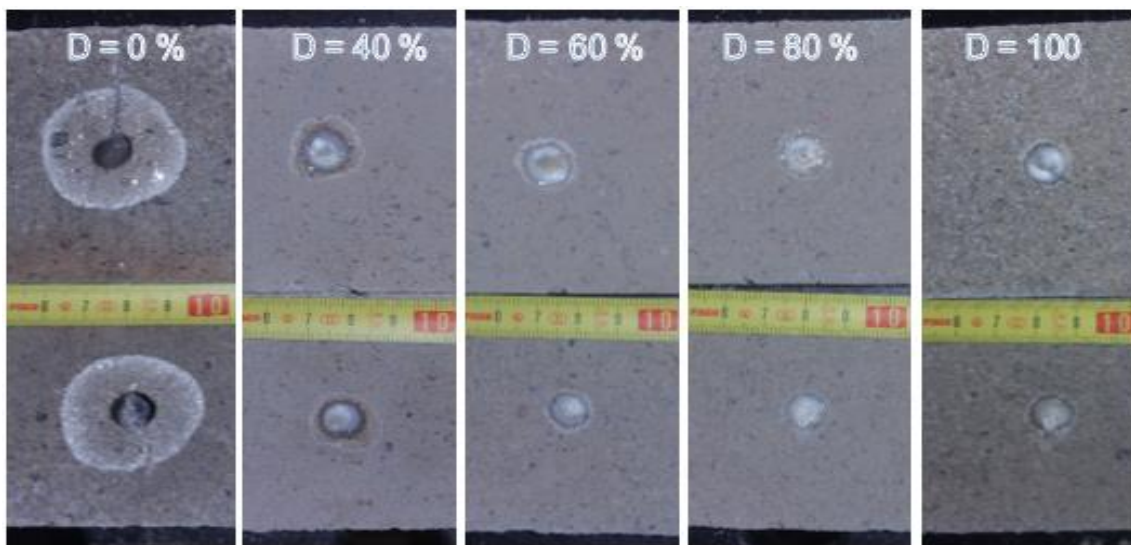


Bild 46: Ausbreitung IM bei verschiedenen Durchfeuchtungsgraden. Deutlich erkennbar ist die abnehmende Ausbreitung mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad [11]

Auf den Bildern lässt sich sehr gut die mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad abnehmende Ausbreitung visuell erkennen. Auffallend ist hierbei, dass bei D(g) von 0% das applizierte IM noch im Bohrkanal erkennbar ist; ein Zeichen, dass hier keine Aufnahme in das Porengefüge des Baustoffes erfolgt ist.

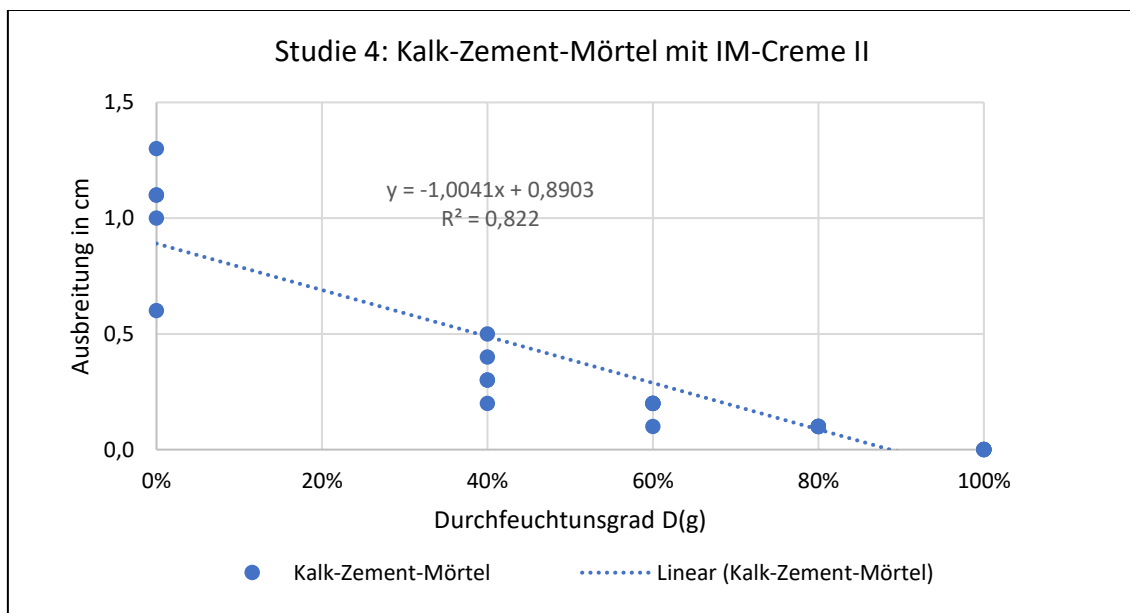


Bild 47: Studie 4, Lineare Regression Mörtel mit IM-Creme II

Trotz sehr geringer Ausbreitung des IM zeigt die gleiche Tendenz einer Abnahme der Ausbreitung mit zunehmender Durchfeuchtung des Baustoffes. Die höchsten Werte der IM-Ausbreitung sind analog der vorangegangenen Studien bei nicht vorhandener Durchfeuchtung (D(g) 0%). Bei einem D(g) von knapp 85% ist keine IM-Aufnahme mehr zu verzeichnen.

5.1.5 Studie 5: Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung

Tab. 8: Kenndaten Studie 5 ([11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	Ziegel (1) Klinker Wienerberger (wasserabweisend) (2) Klinker Matzen Teg! (stark saugend)	Rohdichte (1): 2,2 g/cm ³ Rohdichte (2): 1,8 g/cm ³ Porosität (1): nicht ermittelt Porosität (2): nicht ermittelt
Injektionsmittel:	1-K Verkieselung	Wirkprinzip: hydrophobierend, porenverengend
Applikation:	Dauer 5 Wochen	
Umgebungstemperatur:	3 °C	90 % rel. LF

Hinsichtlich der beiden verwendeten Klinker, sowohl wasserabweisend wie auch in stark saugender Ausführung, wurde eine Applikation über fünf Wochen durchgeführt. Bezüglich des durchgeführten Tropfenaufsetztests waren bei dem starksaugenden Klinker (Matzen Teg!) visuell keine Ausbreitmaße erkennbar.



Bild 48: IM-Ausbreitung bei D(g) 80%, Fabrikat Wienerberger [11]. Die Dunkelfärbung des Klinkers im Bereich des Bohrloches resultiert aus der IM-Aufnahme.



Bild 49: IM-Ausbreitung bei D(g) 40% (Fabrikat Matzen Tegl). Auffallend ist die große Ausbreitung des IM, welche sich fast über den gesamten Querschnitt des Prüfkörpers erstreckt [11]

Bei beiden Bildern fällt im Vergleich zu den vorab vorgestellten Studien eine relativ große Ausbreitung des IM auf. Zum Versuchsablauf ist jedoch anzumerken, dass bei der Durchführung der Untersuchungen Temperaturen um ca. 3° C herrschten.

Gemäß Herstellerangaben ist eine Ausführung der Applikation des IM jedoch bei Temperaturen um + 5° C bis + 30° C vorzunehmen. Aufgrund der relativ niedrigen Temperatur ist auch mit einer Veränderung der chemisch-physikalischen Eigenschaften des IM zu rechnen wie beispielsweise einer Veränderung der Viskosität, was sich wiederum auch wieder auf die Ausbreitung des IM auswirkt. Dahingehend wurde die nachfolgende lineare Regression um die Werte bei D(g) bereinigt.

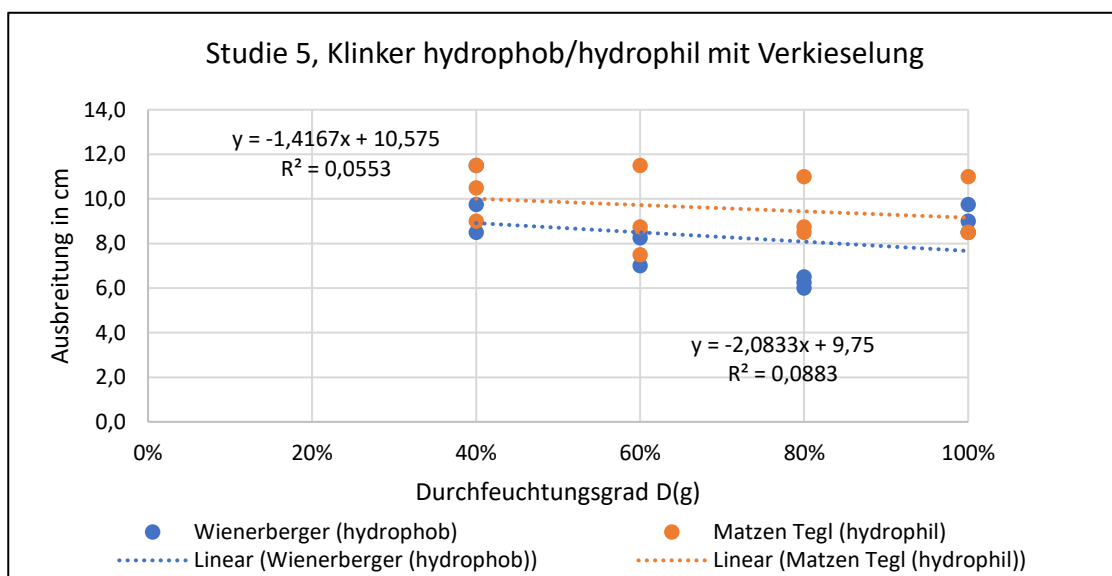


Bild 50: Lineare Regression Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung



Bild 51: Tropfenaufsetztest [11]. Aufgrund eingetretener Hydrophobie und Veränderung des Randwinkels des aufgesetzten Wassertropfens verbleiben die aufgesetzten Tropfen an der Oberfläche

Auch bei den untersuchten Klinkern ist wiederum ein linearer Zusammenhang zwischen Ausbreitung und vorhandenem Durchfeuchtungsgrad erkennbar, wenn auch nur gering ausgeprägt. Die Streuung der erhaltenen Werte sind bei den untersuchten hydrophilen und hydrophoben Klinkern sehr hoch, dahingehend ist das Bestimmtheitsmaß bei beiden untersuchten Klinkern relativ niedrig. Auch bei sehr hohen Durchfeuchtungsgraden ist immer noch mit einer Ausbreitung von zwischen 10 cm und 12 cm zu rechnen.

Die bereits erwähnte Überlegung, dass bei einem Durchfeuchtungsgrad von 100% nahezu der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt ist und für die Aufnahme eines IM wenig Kapazität besteht, geht hier nicht mit den erhaltenen Untersuchungsergebnissen konform. Die Ursache hierfür ist wohl in der veränderten Viskosität des IM aufgrund der niedrigen Temperatur bei der Ausführung der Applikation zu suchen.

5.1.6 Studie 6: Klinker/Kalksandstein mit Verkieselung

Tab. 9: Kenndaten Studie 6 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	(1) Klinker (2) Kalksandstein (KS-Stein)	Rohdichte (1): 2,3 g/cm ³ Rohdichte (2): 2,06 g/cm ³ Porosität (1): 0,03 Porosität (2): 0,08
Injektionsmittel:	1-K Verkieselung	Wirkprinzip: porenverengend, verfestigend
Applikation:	Dauer 7 Tage	
Umgebungstemperatur:	11,5-12,7 ° C	51-55 % rel. LF

Behandelt wurden hier einerseits Klinker sowie Kalksandsteine mit einem Verkieselungspräparat.



Bild 52: Ausbreitung IM KS-Stein bei D(g) 60% [11]



Bild 53: Ausbreitung IM Klinker bei D(g) 0% [11]

Bei dem Baustoff Klinker war so gut wie keine Ausbreitung des IM nach Applikation messbar. Dies mag darin begründet sein, dass sich im Zuge von Voruntersuchungen (Wasseraufnahmekoeffizient nach DIN EN ISO 15148) der verwendete KS-Stein als stark saugend herausstellte, während der Klinker eher als wasserhemmend einzustufen ist.

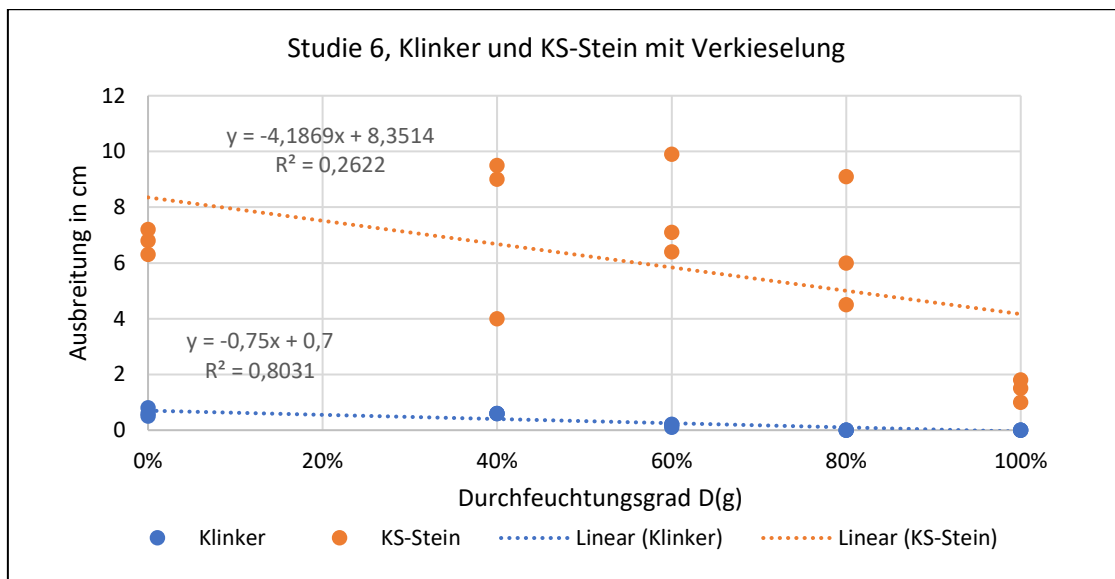


Bild 54: Lineare Regression Klinker/KS-Stein mit Verkieselung

Bei dem behandelten KS-Stein sind starke Schwankungen in der ermittelten Ausbreitung feststellbar, was sich auch in einem geringen linearen Zusammenhang und damit einem niedrigen Bestimmtheitsmaß niederschlägt. Bei Klinker ist die Ausbreitung generell sehr niedrig; beide Baustoffe zeigen jedoch - ebenso wie die vorgestellten Studien - die gleiche Tendenz der Ausbreitung mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad, hier für den Baustoff KS-Stein schwächer ausgeprägt. Ebenso ist bei beiden Baustoffen die maximale IM-Ausbreitung bei einem D(g) von 0%.

Möglicherweise ist eine inhomogene Feuchteverteilung im Baustoff KS-Stein die Ursache für die undifferenzierte Ausbreitung, während beim Baustoff Klinker aufgrund der wasserhemmenden Einstellung und der niedrigeren Porosität generell von einer schlechten IM-Aufnahme auszugehen ist.

5.1.7 Studie 7: Ziegel/Kalksandstein mit IM-Creme

Tab. 10: Kenndaten Studie 7 [11], Angaben des IM-Herstellers)

Material:	(1) Mauerziegel (2) Kalksandstein (KS-Stein)	Rohdichte (1): 2,12 g/cm ³ Rohdichte (2): 1,88 g/cm ³ Porosität (1): 0,09 Porosität (2): 0,21
Injektionsmittel:	IM-Creme	Wirkprinzip: hydrophobierend
Applikation:	drucklos	
Umgebungstemperatur:		13° C, 45% rel. LF

Bei den untersuchten KS-Steinen konnte bei der erfolgten Spaltung nach Applikation keine Ausbreitung visuell festgestellt werden, erst nach Durchführung des Tropfenaufsetztests konnte mittels verbleibenden Wassertropfens eine Hydrophobie durch das IM nachgewiesen werden. Bei den Ziegelproben war bereits kurz nach Applikation und Spaltung eine Ausbreitung visuell feststellbar gewesen.



Bild 55: Ausbreitung IM KS-Stein [11]



Bild 56: Ausbreitung im KS-Stein (farblich gekennzeichnet) [11]

Zur besseren optischen Darstellung wurden die hydrophobierten Bereiche bei den Bildern 55 und 56 farblich unterlegt.



Bild 57: Ausbreitung IM bei Ziegel [11]

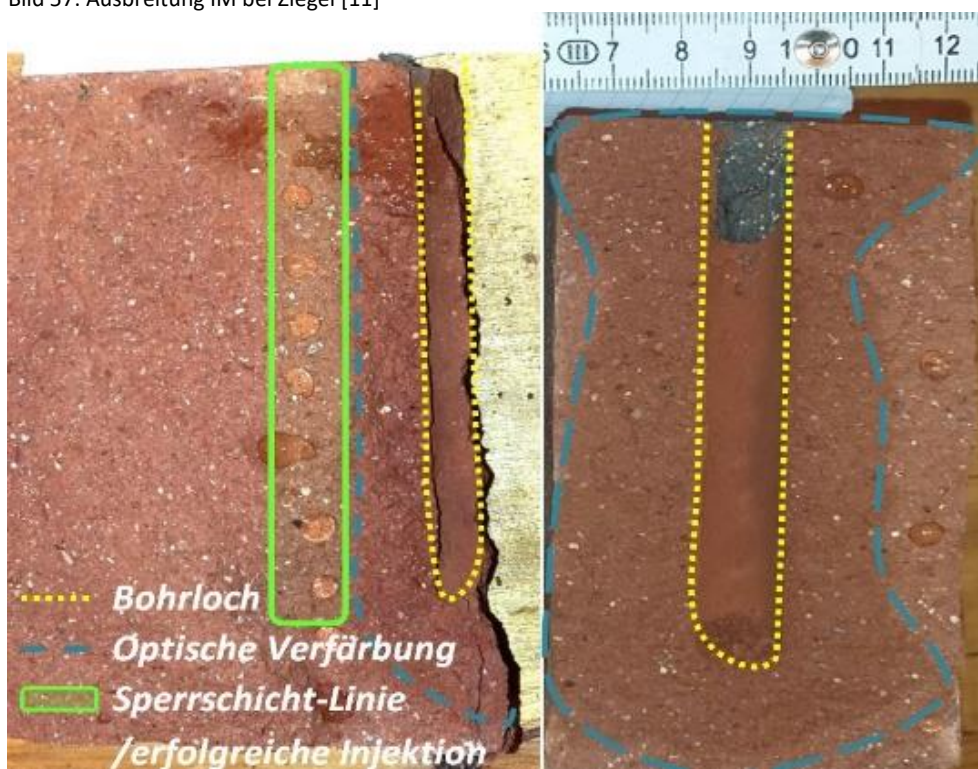


Bild 58: Ausbreitung IM bei Ziegel [11]. Zur Veranschaulichung sind die entsprechenden Bereiche farblich aufbereitet

Zur besseren Darstellung wurden auf den Bildern 57 und 58 die hydrophobierten Bereiche farblich unterlegt.

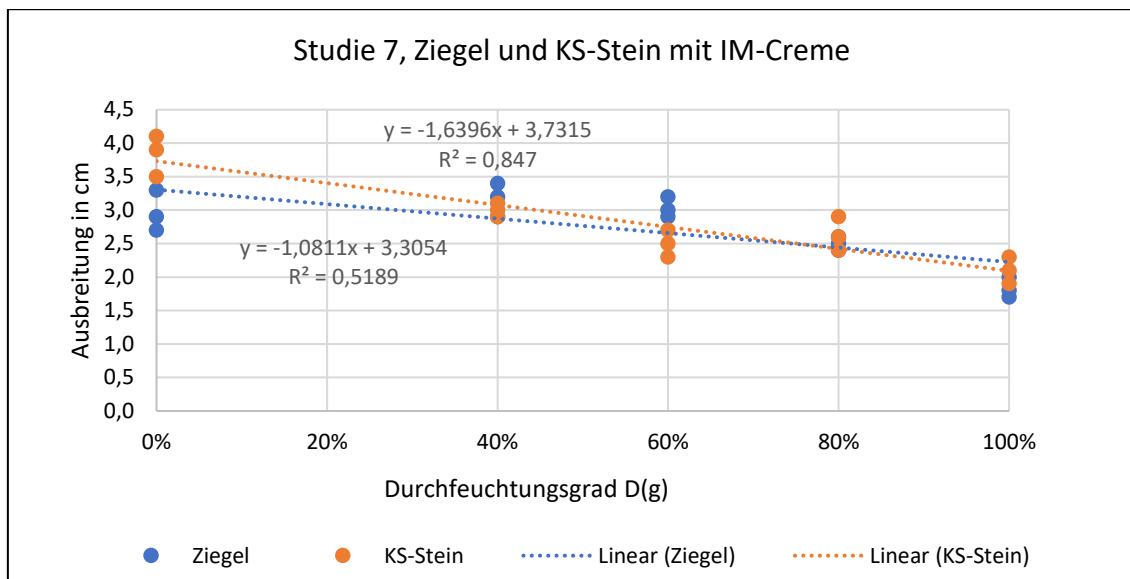


Bild 59: lineare Regression Ziegel und KS-Stein mit Verkieselung

Eine vergleichbare Tendenz wie bei den anderen vorgestellten Studien lässt sich auch hier feststellen: die Abnahme der Ausbreitung des IM mit steigendem D(g). Auch die maximale Ausbreitung des IM ist bei einem D(g) von 0% bei KS-Stein vorhanden, während bei Ziegel eine Maximalausbreitung im Bereich zwischen D(g) 40% bis 60% vorhanden ist.

Es bleibt Raum für Diskussionen, ob beim Baustoff Ziegel eine gewisse Grundfeuchte im Porenraum vorhanden sein muss, damit das IM transportiert werden kann.

Wie bereits in Studie 3 festgestellt, ist auch hier bei einem hohen D(g) noch mit einer Ausbreitung eines IM zu rechnen, selbst wenn die Grundtendenz generell rückläufig ist.

5.2 Kernphysikalische Untersuchungen

5.2.1 Neutronenradiografie

Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen zur Neutronenradiografie wurden zur ersten Einschätzung der Darstellung einer IM-Ausbreitung mittels kernphysikalischer Verfahren durchgeführt.

Bei den Bildaufnahmen handelt es sich um die grafisch dargestellte Erfassung des Neutronenstrahls, welcher nach Durchgang durch den Prüfkörper mittels Detektor erfasst wird.

Die Bereiche, in denen der Neutronenstrahl aufgrund inkohärenter isotroper Streuung von Neutronen an wasserstoffhaltigen Atomkernen im Prüfkörper abgelenkt (geschwächt) wird, werden im Vergleich zur übrigen Fläche als dunkel kontrastiert dargestellt.

Zur feineren Darstellung der vorgenannten Kontrastierung werden nachstehend erst die Originalaufnahmen der Radiografie präsentiert, in einer weiteren Aufnahme die relevanten Bereiche farblich kontrastiert.

Der Prüfkörper des Beispiels 2 ist freundliche Leihgabe von R. Weischedel, Hochschule Wismar.

Beispiel 1:

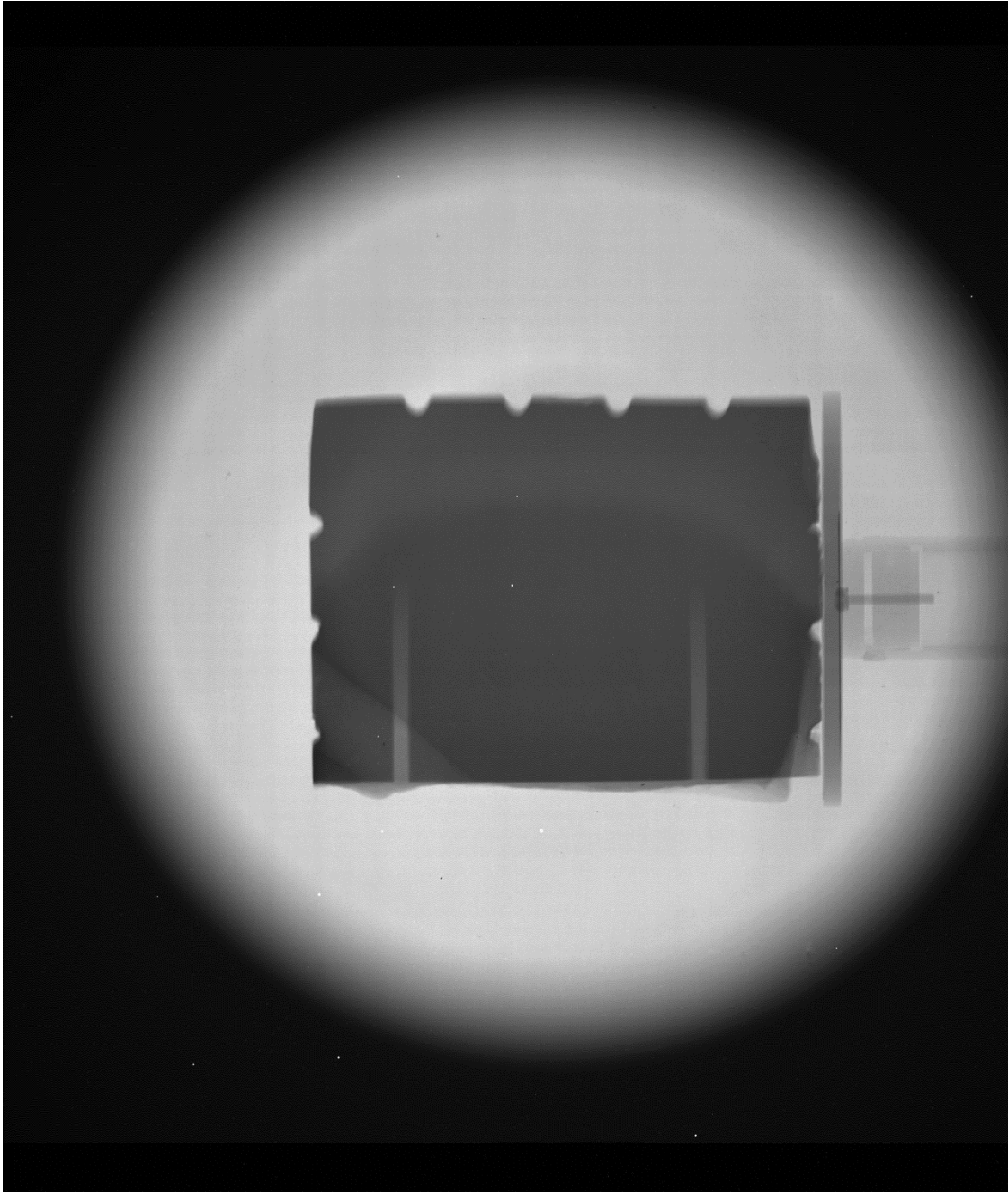


Bild 60: Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt

Dargestellt ist eine Ziegelhälfte, die nach Spaltung des Prüfkörpers entstanden ist. Im oberen Bereich des Prüfkörpers ist ein Teil des diagonalen Verlaufes des Bohrloches erkennbar, anschließend ist der halbkreisförmige Verlauf der IM-Ausbreitung erkennbar. Das nachfolgende Bild ist identisch, jedoch sind die relevanten Bereiche wie Ausbreitungsgrenze (grüne Linie) wie auch Bohrloch (rote Linie) zur besseren Nachvollziehbarkeit farblich unterlegt. Der weiße Lichtkegel, welcher den Prüfkörper umrandet, besteht aus dem Neutronenstrahl, welcher auf den Prüfkörper trifft.

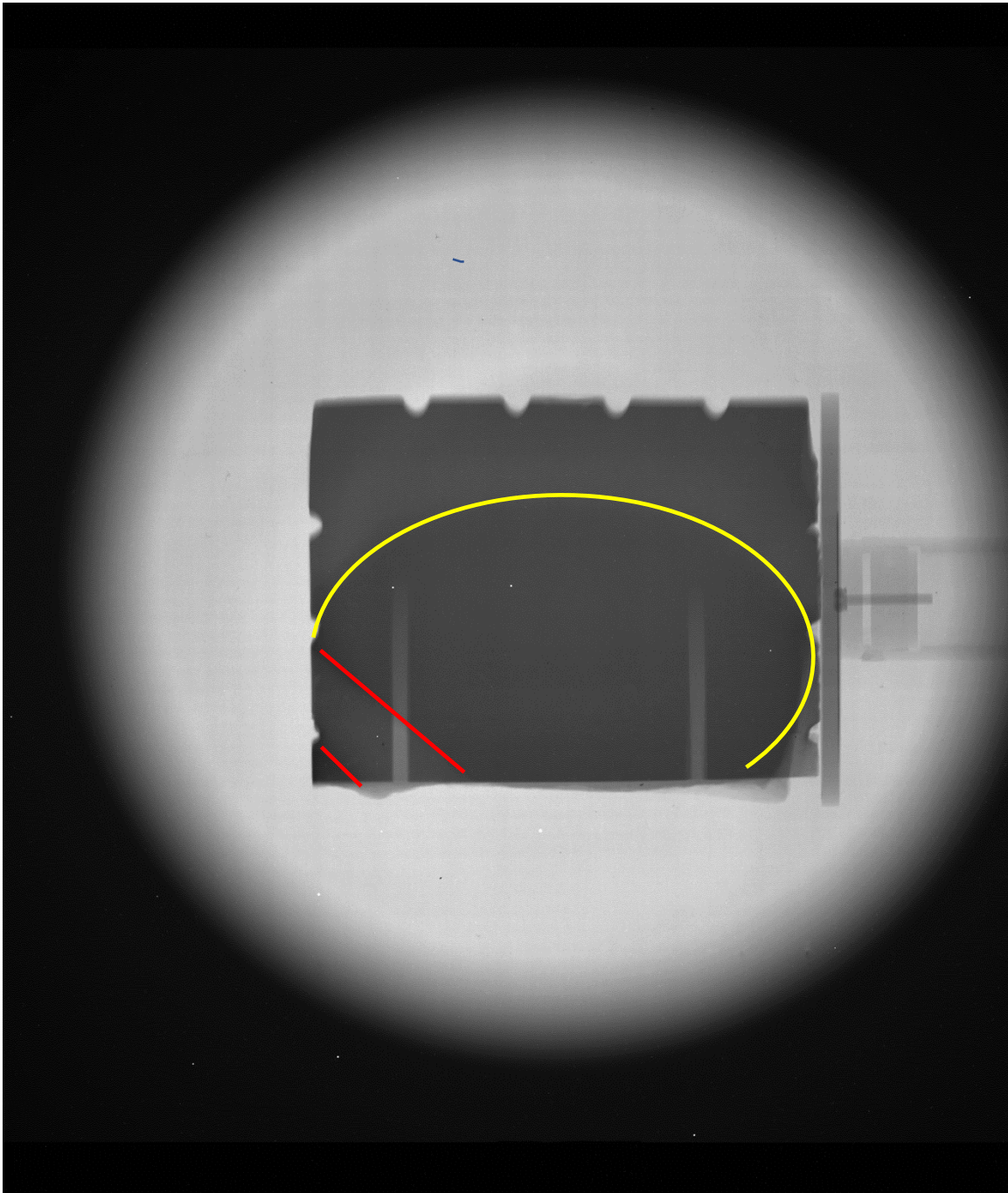


Bild 61: Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt

Erkennbar ist die ovale Ausprägung der IM-Ausbreitung (grüne Linie), welche sich über annähernd die gesamte Höhe des Ziegels abzeichnet. Mit den roten Geraden gekennzeichnet ist das ehemalige Bohrloch. Appliziert wurde ein 1-K IM aus Kunstharzkautschuk.

Bei den kleinen weißen Flecken, welche kreisförmig um die Ausbreitungszone des IM liegen, kann es sich um Mikrorisse handeln, welche aufgrund mechanischer Einwirkung im Zuge der Bohrloch-Herstellung entstanden sind.

Beispiel 2:

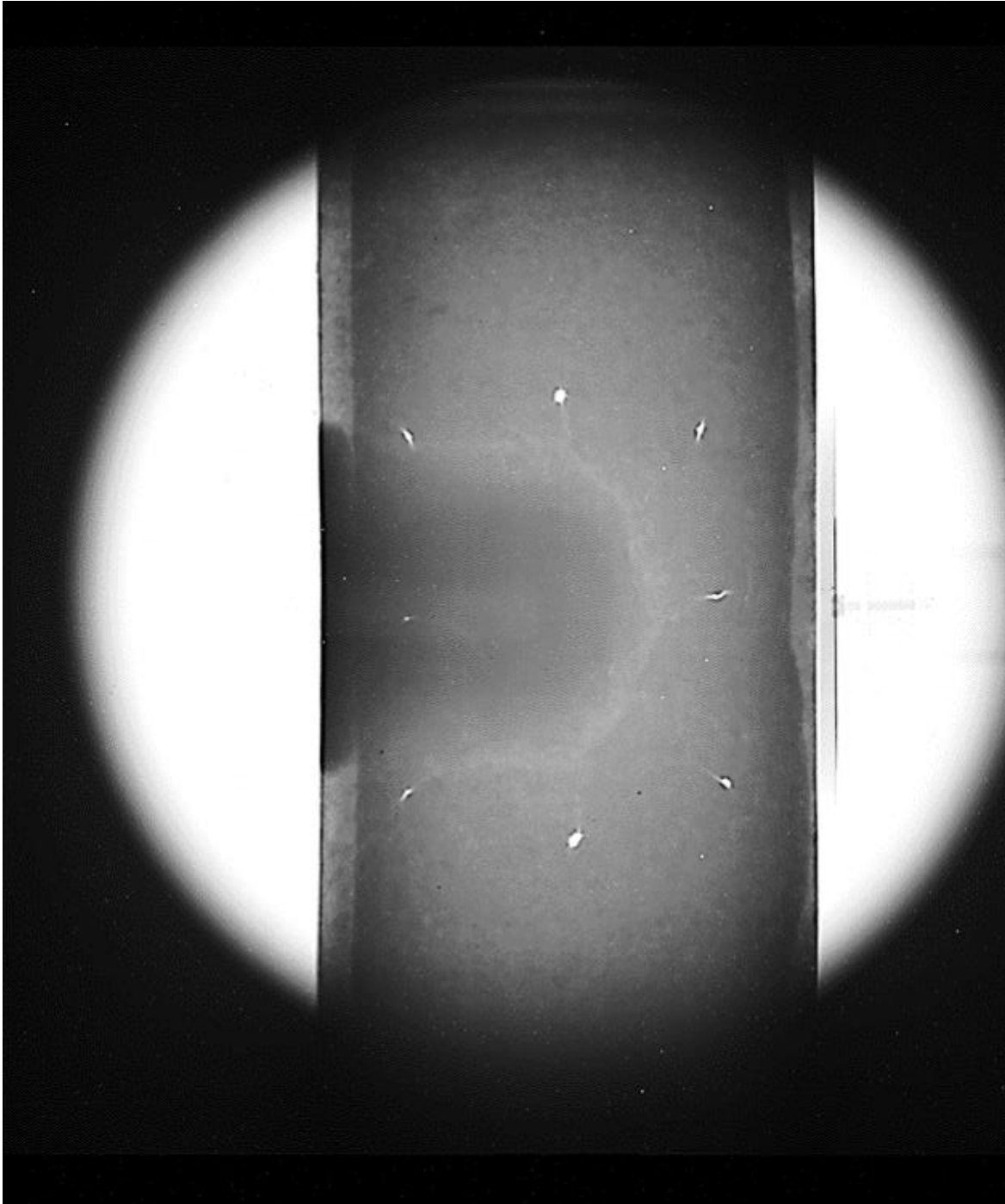


Bild 62: Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch gerade

Bei der gegenständlichen Aufnahme handelt es sich um die Aufnahme eines Ziegelprüfkörpers, bei welchem das IM über ein horizontales Bohrloch appliziert wurde. Deutlich erkennbar ist auch ein Bereich erhöhter IM-Gehalte im unmittelbaren Bereich des Bohrloches, dargestellt an der Dunkelfärbung.

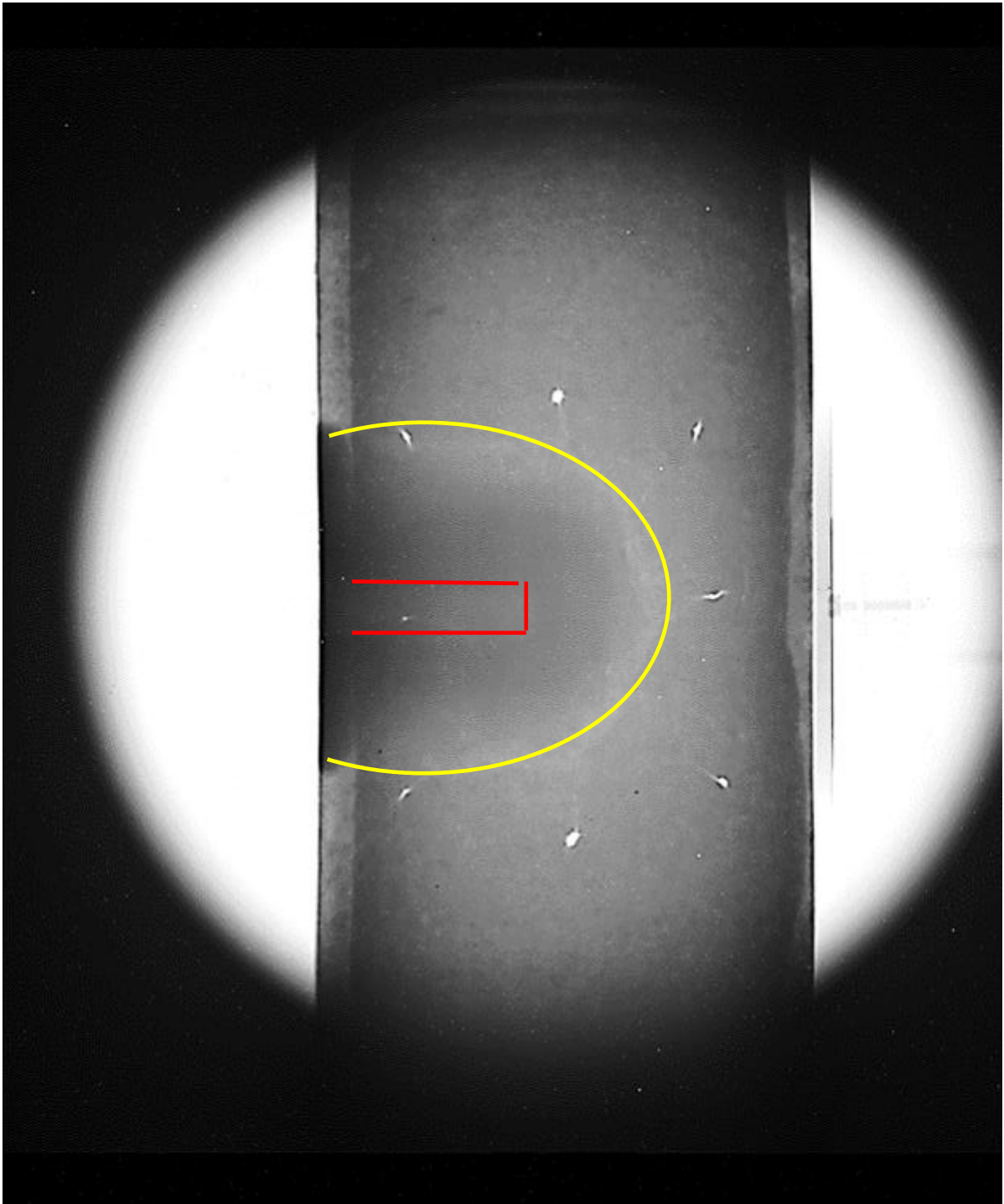


Bild 63: Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch gerade

Bei dem gegenständlichen Prüfkörper wurde ein 1-K Kunstharz über ein gerades Bohrloch (rote Linie) appliziert, erkennbar ist eine halbrunde Ausbreitung des IM um das Bohrloch herum (grüne Linien).

Beispiel 3:

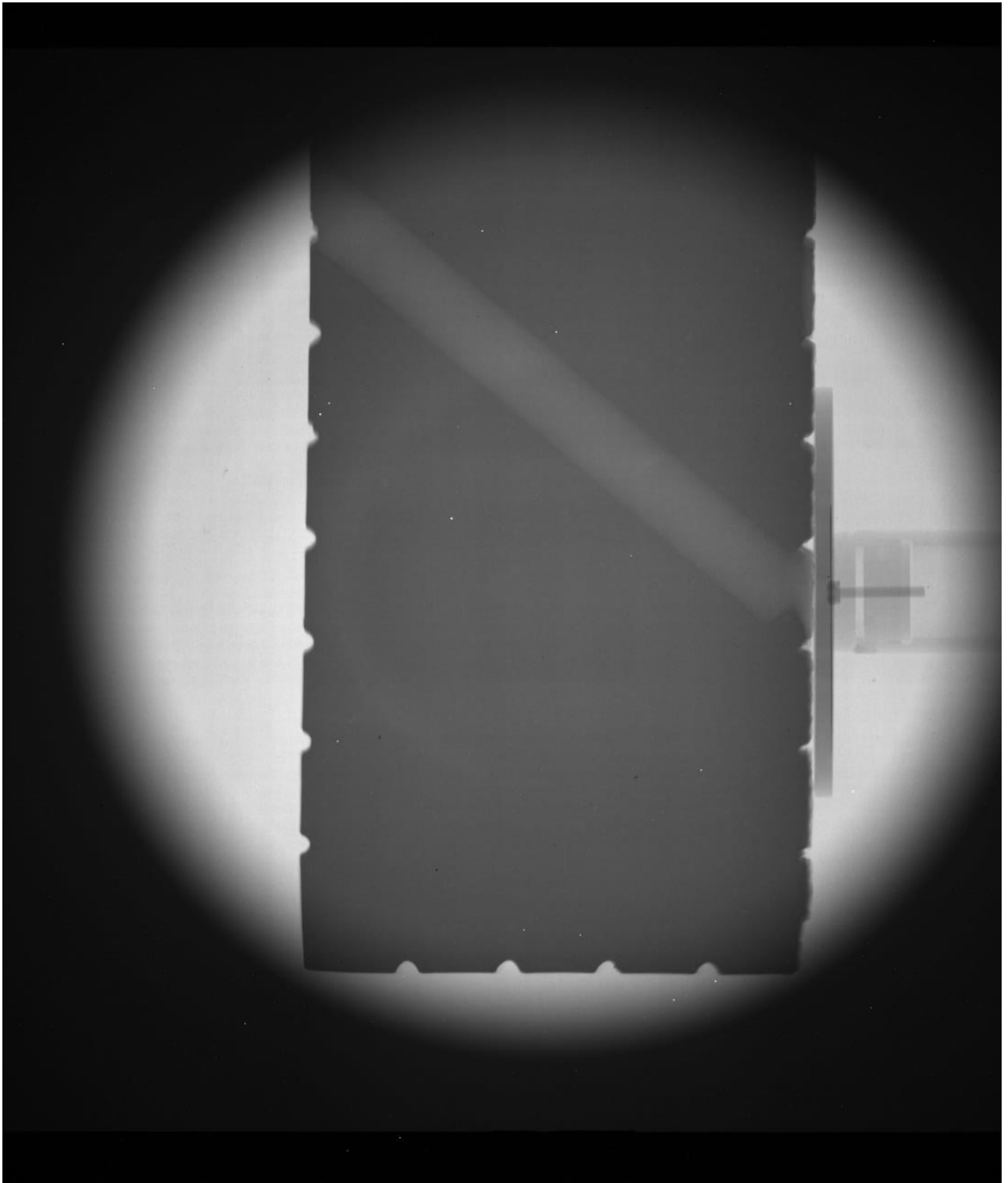


Bild 64: Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt

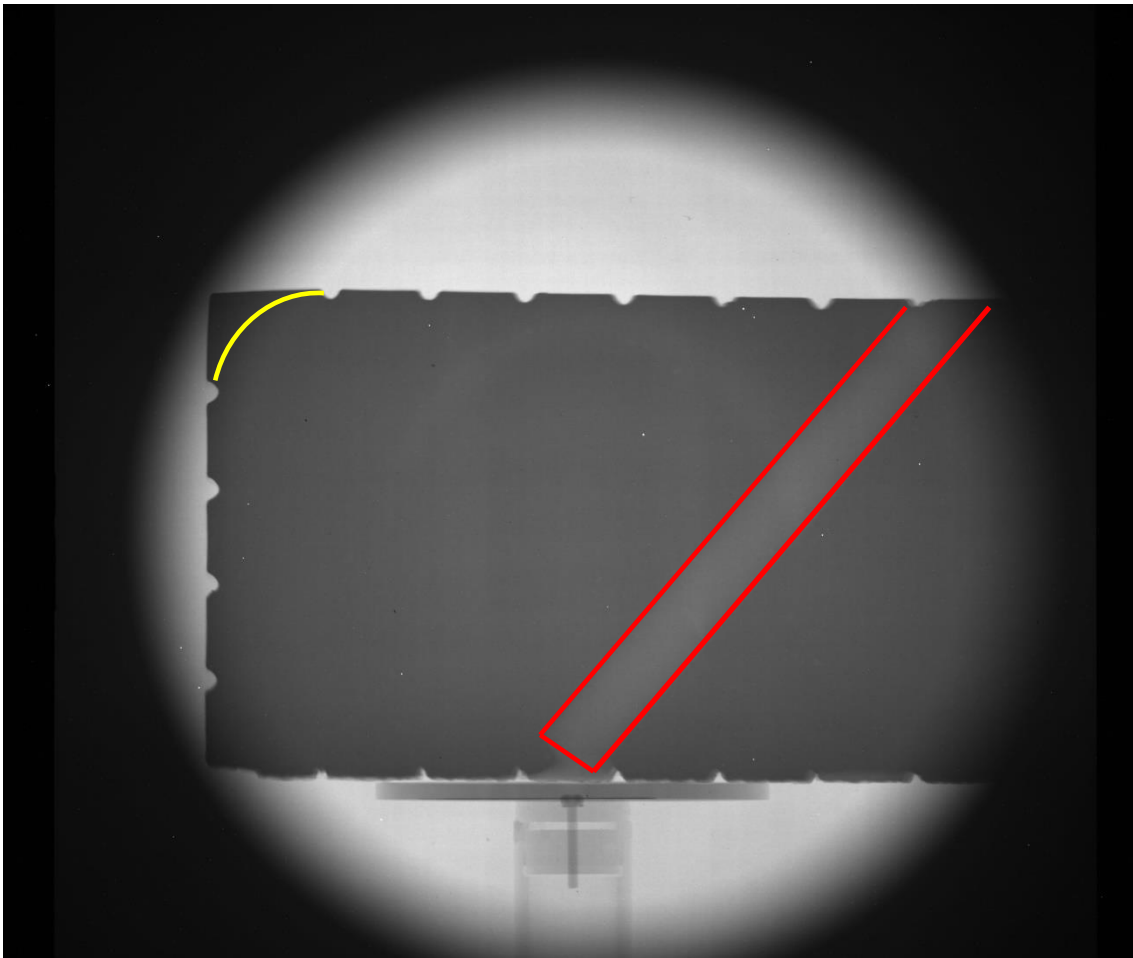


Bild 65: Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt

Aufgrund der großflächigen Ausbreitung des IM im Ziegelprüfkörper wurde zur bildhaften Darstellung der Ausbreitungsgrenze der Prüfkörper auf dem Probenteller verschoben, so dass dieser in der Gesamtheit nicht erfasst werden konnte. Aufgrund der umfangreichen Ausbreitung des IM im Prüfkörper war nur im oberen rechten Eckbereich ein unbehandelter Bereich noch erkennbar.

Bei allen drei Prüfkörpern war die Ausbreitung des IM aufgrund der durch das Verfahren erzeugten Kontrastierung erkennbar, deswegen kann dieses Verfahren hinsichtlich der Fragestellung als geeignet angesehen werden. Unter Zuhilfenahme entsprechender Software ist es zudem möglich, erkennbare Distanzen auf den Aufnahmen zu erfassen. Ebenso sind kleinere makroskopische Auffälligkeiten im Baustoff, wie beispielsweise die durch Herstellung des Bohrloches entstandenen kleinsten Risse mittels dieses Verfahrens darstellbar.

5.2.2 Neutronentomografie

Eine dreidimensionale Darstellung von Neutronenradiografien wird auch als Neutronentomografie bezeichnet.

Dabei wird in bestimmten Zeitabschnitten der Probenteller um wenige Grad gedreht und hierbei eine Neutronenradiografie aufgenommen.

Nach einer vollständigen Drehung des Proben-tellers um 360° werden die umfangreichen Einzel-aufnahmen unter Zuhilfenahme der Software VGStudio by Volume Graphics zu einer einzigen, dreidimensionalen Aufnahme zusammengefügt.

Nachfolgend sollen zwei unterschiedliche Studien vorgestellt werden:

In Studie a) wurden Ziegelprüfkörper unterschiedlicher Durchfeuchtungsgrade untersucht. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Studien unter Punkt 5.1 ff. ist mittels der vorgestellten Untersuchungsmethode jedoch auch ein „Blick in das Innere“ des Baustoffes möglich und kann somit Anhaltspunkte über die Verteilung des IM im Inneren des Baustoffes liefern. Aufgrund der Tatsache, dass verschiedene Durchfeuchtungsgrade untersucht wurden, ist zudem eine Aus-sage hinsichtlich der Ausbreitung mit zunehmender Durchfeuchtung des Baustoffes möglich.

Studie b) hingegen schlüsselt verschiedene Ebenen eines Prüfkörpers hinsichtlich des Vorhan-denseins und der Ausbreitung eines applizierten IM auf, was wiederum Hinweise auf mögliche Anreicherungs-zonen eines IM im Baustoff liefern kann.

Den nachfolgenden Ausführungen zu den vorliegenden Ergebnissen sollen jedoch noch einige grundlegende Erläuterungen zum besseren Verständnis vorangestellt werden.

Wie bereits erwähnt, wird der Neutronenstrahl, welcher beim Messvorgang auf den Prüfkörper trifft, je nach Vorhandensein von Wasserstoffprotonen aus der Flugbahn abgelenkt („gestreut“), so dass nur diejenigen Neutronen mittels Detektor erfasst werden, welche durch den Prüfkörper durchgängig sind.

Die sogenannten Intensitätswerte, also die Zählwerte auf dem Detektor, werden auch als linea-rer Schwächungskoeffizient bezeichnet. Die Einheit des Koeffizienten wäre theoretisch 1/cm. Aus Praktikabilitätsgründen, da eine Kalibrierung der Intensitäten zu aufwendig ist, werden die Maßeinheiten jedoch frei gewählt [66].

Die minimalen und maximalen Intensitätswerte, welche auf dem Detektor gemessen werden, entsprechen hierbei den niedrigsten und den höchsten Grauwerten; durch Einfügen dieser Werte in eine 16 bit-Datei werden daraufhin Zählwerte im Bereich zwischen 0 und 65000 ska-liert.

Zur besseren optischen Darstellung ist es möglich, den entsprechenden Grauwerten farbliche Entsprechungen zuzuordnen; diese werden jedoch auch dann immer noch als „Grauwerte“ be-zeichnet. Diese Vorgehensweise wird separat für jede gemessene Probe durchgeführt und so-fern die Messeinstellungen identisch sind, können nach einer Neuskalierung die Farben auf den Bildern Werte darstellen, welche vergleichbar sind.

Hinsichtlich der vorgenannten Skala sind Bereiche hoher Intensitäten bzw. hoher Grauwerte durch die Farbe Rot gekennzeichnet, abnehmend über die Farbe Grün mit einer mittleren Inten-sität bzw. mittlerer Grauwerte und geringe Intensitäten bzw. Grauwerte sind mit der Farbe Blau hinterlegt.

Nachfolgend sollen die Ergebnisse der vorgenannten kernphysikalischen Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Studien vorgestellt werden. Während bei Studie 1 der Fokus auf der Ver-teilung des IM im Prüfkörper bei unterschiedlichen Durchfeuchtungsgraden liegt, zielt der Schwerpunkt von Studie 2 auf die Verteilung eines IM im Prüfkörper selbst ab.

Studie a) Untersuchung von Ziegelproben bei unterschiedlichen Durchfeuchtungsgraden

Mittels des vorgenannten Verfahrens wurden nachfolgende Prüfkörper untersucht:

- Ziegel Mz, Vollziegel mit den Abmessungen 240x115x71mm
- Rohdichte 2,0 kg/dm³
- IM: 1-K Kunstharzkautschuk, Wirkprinzip hydrophobierend*
- Bohrloch: diagonal
- Eingestellte D(g): 50%, 70%** , 90%

* Hinsichtlich des verwendeten IM ist ergänzend anzumerken, dass es sich hierbei um einkomponentiges (1-K) IM handelt, welches aufgrund der Zusammensetzung eine verzögerte Einlauf- und Wirkzeit aufweist. Das IM bleibt nach Angaben des Herstellers nach der Applikation noch 6 bis 8 Wochen kriechfähig, wodurch eine größere Ausbreitung verbunden sein soll.

** Erhaltene Untersuchungsergebnisse hinsichtlich D(g) 70% wurden aufgrund mangelnder Aussagekraft nicht in die Auswertung miteinbezogen, eine Berücksichtigung bei den nachfolgenden Auswertungen erfolgt hierbei nicht.

Bei den gegenständlichen Prüfkörpern lagen gleiche Messbedingungen (Messzeiten und gleicher Versuchsaufbau) vor, so dass die erhaltenen Werte vergleichbar sind. Hinsichtlich der Probenvorbereitung ist anzumerken, dass die Applikation des IM nach Einstellung der jeweiligen Durchfeuchtungsgrade erfolgte.

Vor der Messung wurden die Proben 48 Stunden bei einer Temperatur von 40° C getrocknet. Die relativ niedrige Temperatur ist dahingehend begründet, dass eine thermische Einwirkung auf das IM mit möglichen nachfolgenden negativen Auswirkungen hinsichtlich des Ergebnisses vermieden werden sollte.

Gesamtübersicht:

Zuerst soll anhand einer Darstellung aller vier Proben eine Gesamtübersicht der jeweiligen Ansichten dargestellt werden, anschließend wird auf die einzelnen Prüfkörper detailliert eingegangen.

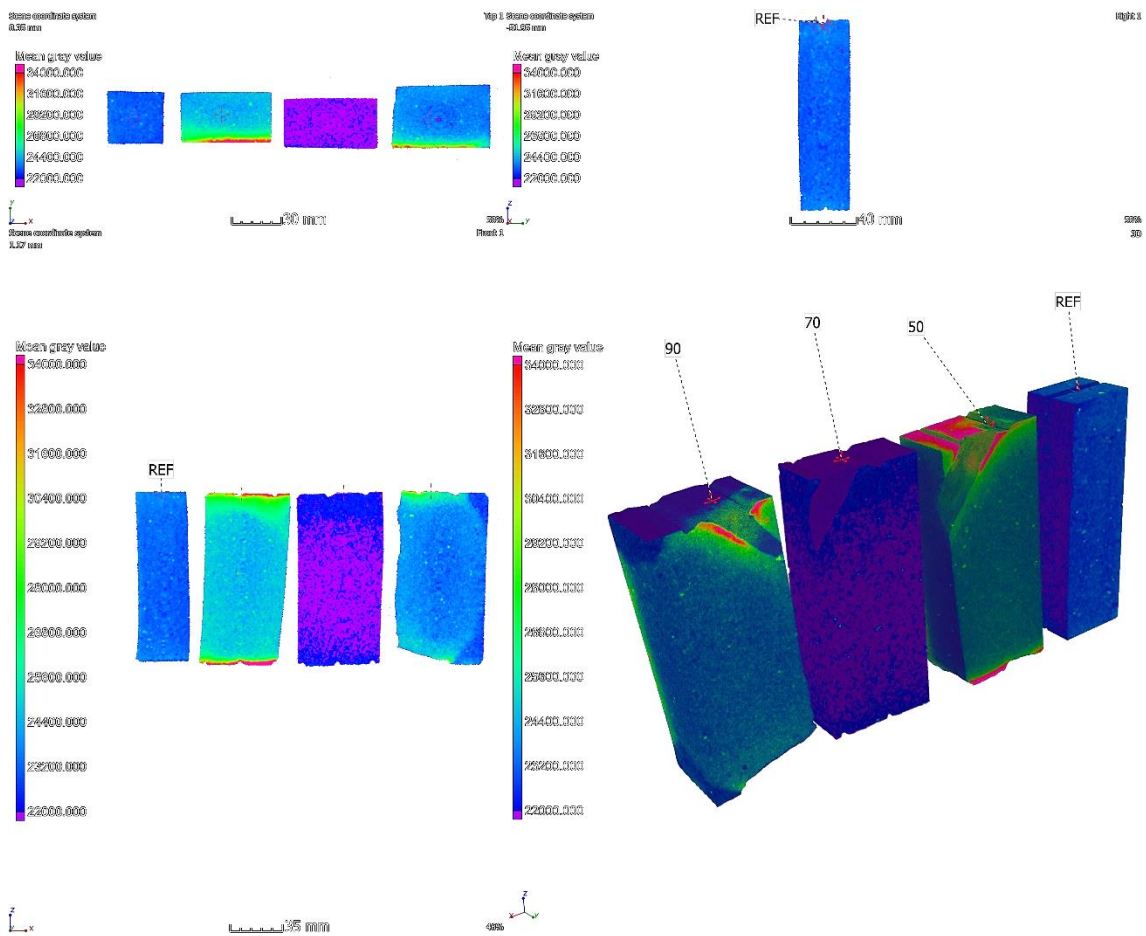


Bild 66: Übersicht Neutronentomographie aller vier Prüfkörper in der Seitenansicht. Die Ziffern über den Prüfkörpern geben hierbei den jeweiligen Durchfeuchtungsgrad bzw. die Referenzprobe an.

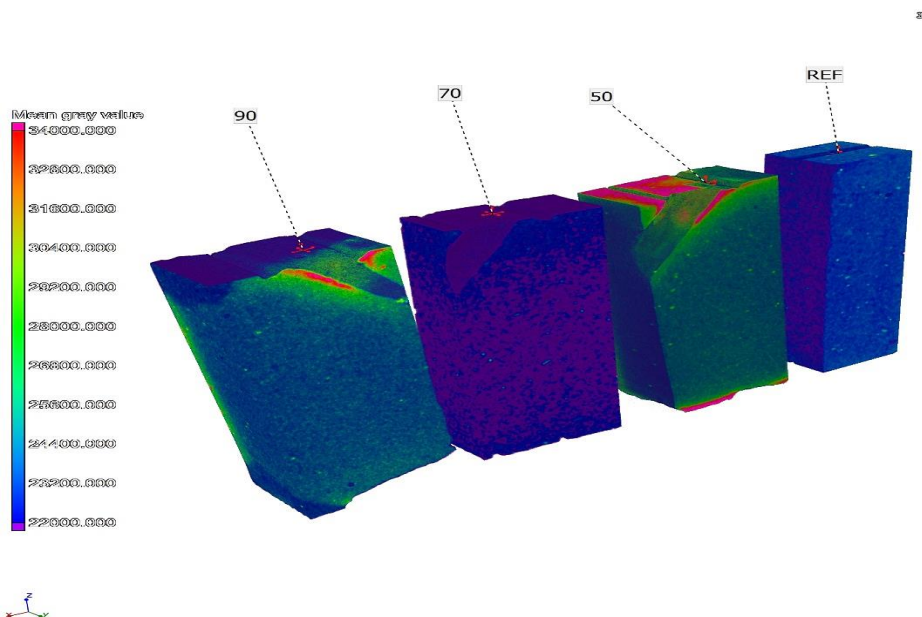


Bild 67: Ansicht aller vier untersuchten Prüfkörper. Auffallend sind die Bereiche erhöhter Grauwerte um das Bohrloch.

Durch Darstellung unterschiedlicher Frontansichten der gleichen Prüfkörper konnten nachfolgende Grauwerte ermittelt werden:

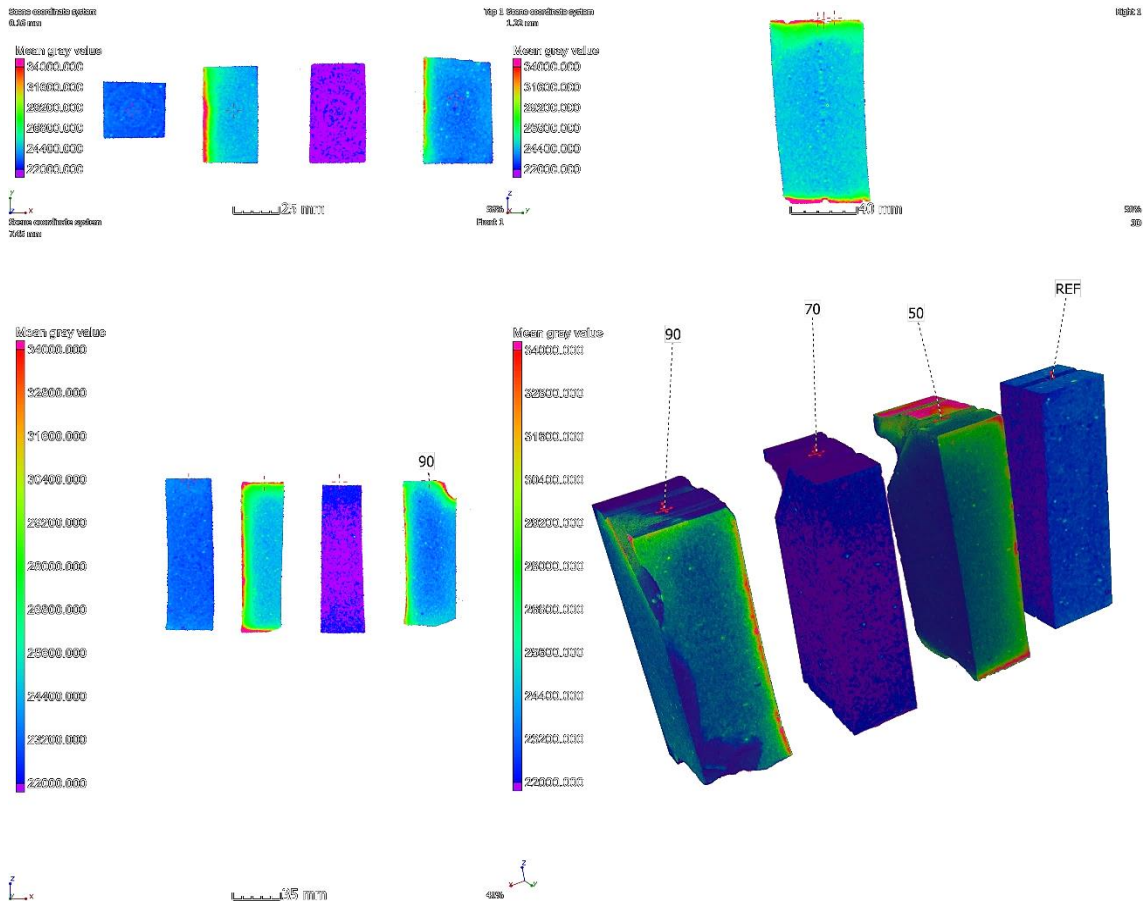


Bild 68: Schrägansicht der vier Prüfkörper

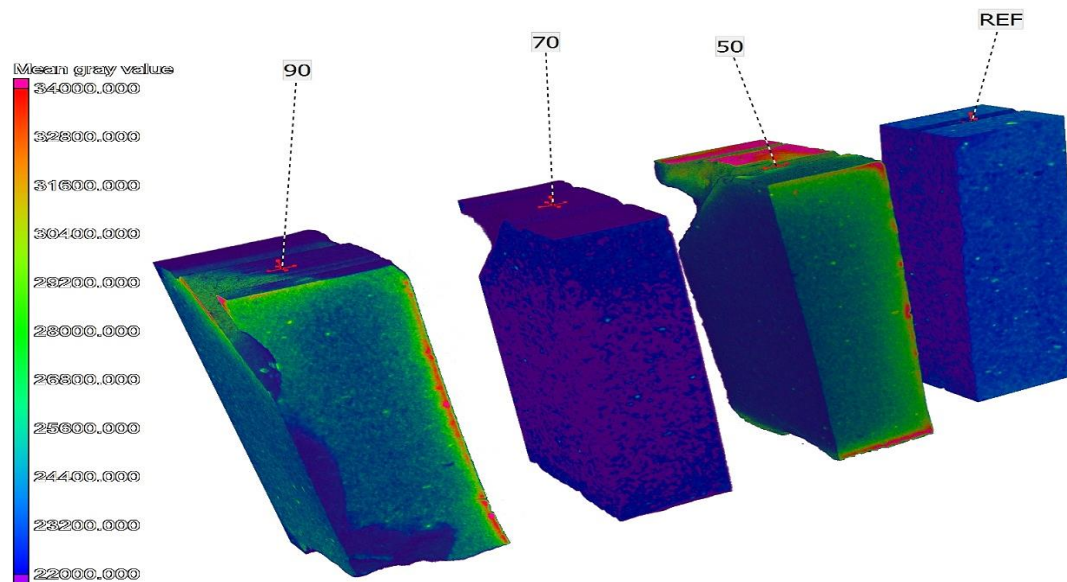


Bild 69: Schrägansicht der vier Prüfkörper wie vor, Detail

Referenzprüfkörper:

Als Referenzprüfkörper wurde ein unbehandelter Ziegelprüfkörper verwendet, d.h. an diesem wurde kein Injektionsmittel appliziert. Die unbehandelte Referenzprobe zeigte erwartungsgemäß bei allen Messungen keine Intensitäten; das heißt jedoch auch, dass die festgestellten Intensitäten bzw. Grauwerte der beiden anderen Durchfeuchtungsgrade (50% und 90%) nicht durch den Baustoff selbst bedingt sein können, sondern auf das applizierte IM zurückzuführen sind. Die leicht changierenden Farbverläufe sind auf die unterschiedlichen Bestandteile des Ziegels zurückzuführen.

Durchfeuchtungsgrad 50%:

Deutlich erkennbar sind auf der Darstellung rechts unten bei einem D(g) von 50% hohe Grauwerte (Rotfärbung) im oberen wie im unteren Bereich des Prüfkörpers. Hierbei handelt es sich um die maximalen Ausbreitungsgrenzen des IM, welche jedoch durch die Abmessungen der Prüfkörper limitiert werden, d.h. in diesem Falle wäre die Ausbreitung des IM größer als die Bemessungen des Prüfkörpers.

Die lokalen hohen Grauwerte im oberen und unteren Bereich des Prüfkörpers lassen sich zudem durch die für die Ausbreitung des IM ursächlichen Prozesse des kapillaren Saugens (entgegen der Schwerkraft) sowie der Schwerkraft erklären. Dadurch, dass die Ausbreitung des IM durch die Abmessungen des Prüfkörpers nicht weiter erfolgen konnte, ist plausibel, dass es im Zuge einer nach Applikation erfolgten Exposition mit Raumluft zu einem Verdunsten der im IM enthaltenen Lösungsmittel und dadurch zu einer Anreicherung von hydrophobierenden Reagenzien (Silane, Siloxane) in den Außenbereichen des Prüfkörpers kam.

Die in den vorgenannten Reagenzien enthaltenen Wasserstoffatome führen dann letztendlich aufgrund deren lokaler Anreicherung in den Randbereichen des Prüfkörpers zu den ermittelten hohen Grauwerten.

Durchfeuchtungsgrad 90%:

Bei einem Durchfeuchtungsgrad von 90% besteht nur noch eine geringe Kapazität der Poren, drucklos appliziertes IM in den Porenraum aufzunehmen. Wie aus Bild xx ersichtlich ist, sind bei diesem Durchfeuchtungsgrad die hohen Grauwerte, welche bei D(g) 50% durch die lokale Rotfärbung erkennbar waren, stark rückläufig. Lediglich im Bereich des ehemaligen Bohrloches sind noch vereinzelt lokal erhöhte Grauwerte vorhanden. Dahingehend kann gefolgert werden, dass sich anhand dieses Verfahrens bei hohen Durchfeuchtungsgraden zu einer geringeren Grauwerte und damit geringeren IM-Gehalte im Baustoff feststellen lassen, eine lokale Anreicherung in den Randbereichen des Baustoffes findet aufgrund der geringeren Ausbreitung nicht mehr statt.

Dreidimensionale Verteilung der Grauwerte im Inneren der Prüfkörper:

Hierzu ist es möglich, unter Zuhilfenahme entsprechender Software (VGStudio) verschiedene Schnittebenen durch die Prüfkörper zu legen und nachfolgend Informationen über die Verteilung der Grauwerte bei der jeweiligen Schnittebene zu erhalten.

Bei den gegenständlichen Prüfkörpern soll dies nachfolgend beispielhaft an mehreren Schnittebenen dargestellt werden.

Querschnitt Randbereich der Prüfkörper:

Während bei D(g) 50% wie bereits festgestellt sich aufgrund der umfangreichen Ausbreitung des IM lokale Anreicherungen des IM im Randbereich des Prüfkörpers abzeichnen (Bild xx), ist bei einem vergleichbaren Schnitt bei D(g) 90% so gut wie keine Anreicherung in den Randbereichen mehr feststellbar (Bild xx). Bei beiden Durchfeuchtungsgraden sind zum Inneren des Prüfkörpers hin abnehmende Grauwerte mit dem Farbverlauf von grün nach blau feststellbar. Anzumerken ist hier, dass es sich um halbierte Prüfkörper (Breite ca. 3cm, siehe nachfolgendes Bild) und die nachfolgende Darstellung nicht den gesamten Prüfkörper abbildet.

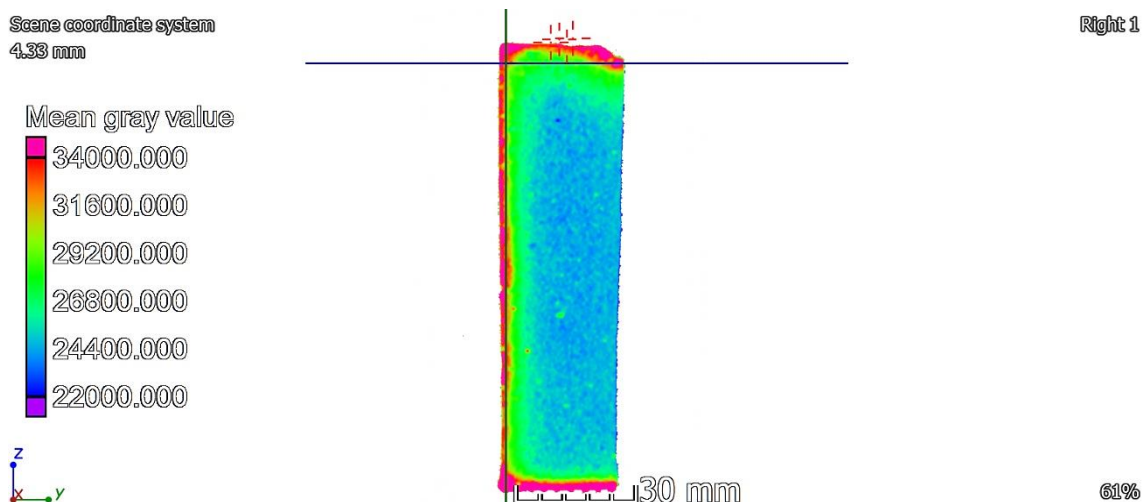


Bild 70: Querschnitt Grauwerte Verteilung bei D(g) 50%

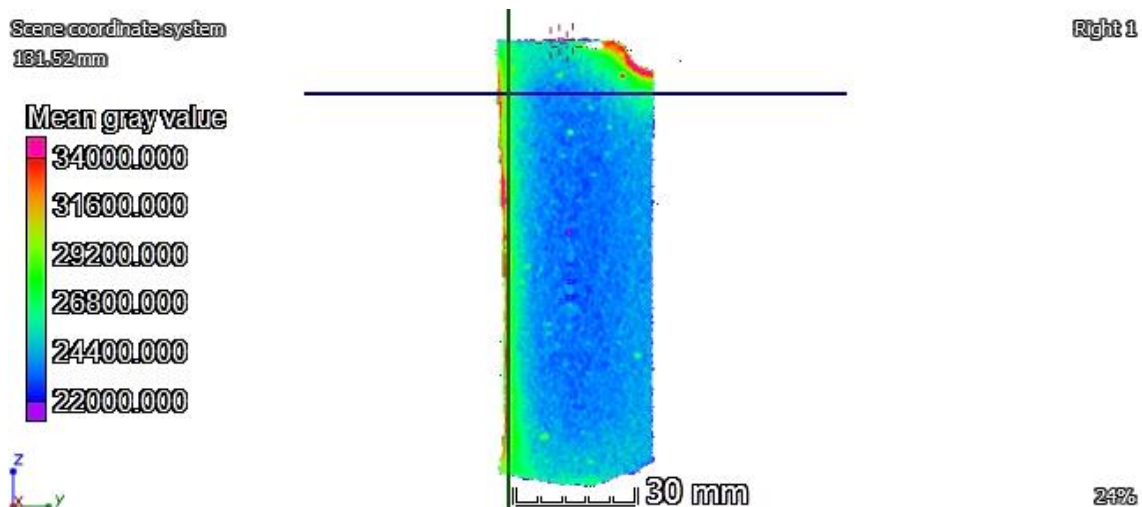


Bild 71: Querschnitt Grauwerte Verteilung bei D(g) 90%

Oberflächennaher Horizontalschnitt, Tiefe 1,5 cm

Etwa 1,5 cm unter der Oberkante des Prüfkörpers, geringfügig durch die tatsächliche Höhe des Prüfkörpers variierend, wurde eine Schnittebene durch alle Prüfkörper gelegt.

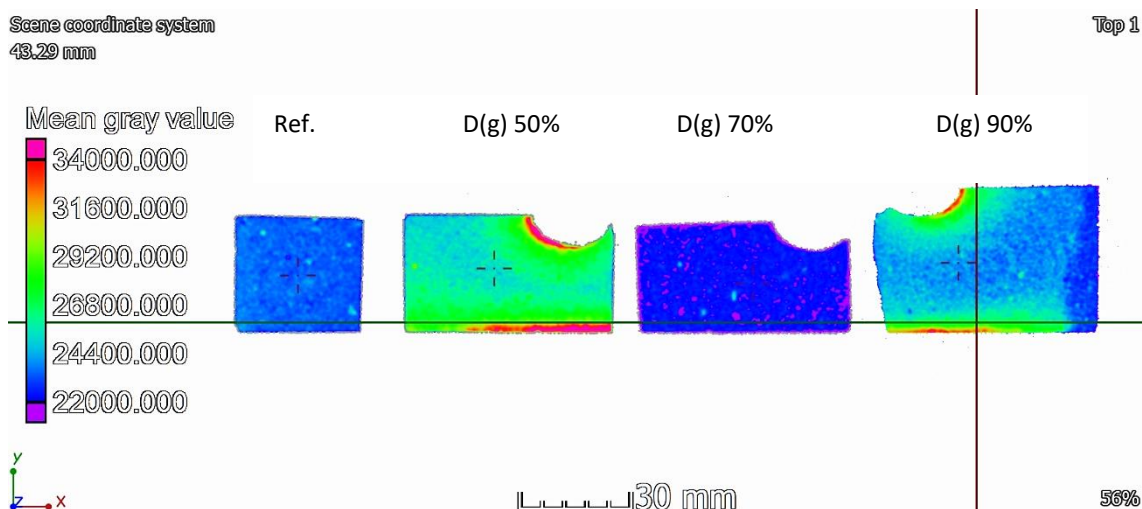


Bild 72: Oberflächennaher Horizontalschnitt Prüfkörper komplett

In diesem Bereich sind bei D(g) 50% noch die lokalen Anreicherungen des IM, dargestellt durch die Rotfärbung, erkennbar. Abgehend hiervon gibt es Bereiche mittlerer Grauwerte, welche zur Prüfkörpermitte hin abnehmen. Bei D(g) 90% ist eine ähnliche Ausprägung vorhanden, jedoch in wesentlich geringerer Ausprägung.

Die Bereiche erhöhter Grauwerte im unteren Bildbereich sind möglicherweise dadurch zu erklären, dass es sich hierbei um die kürzeste Distanz handelt, welche durch das IM zurückgelegt wurde und es infolge Raumluft-Exposition zu einer Anreicherung kam; letztendlich ist dies jedoch nur als Hypothese zu verstehen.

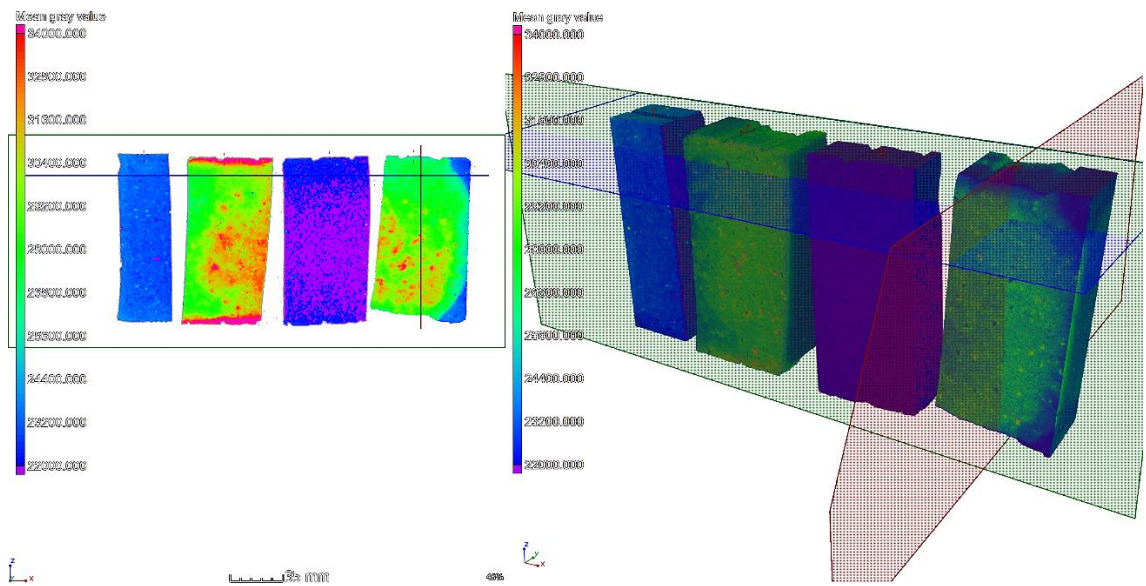
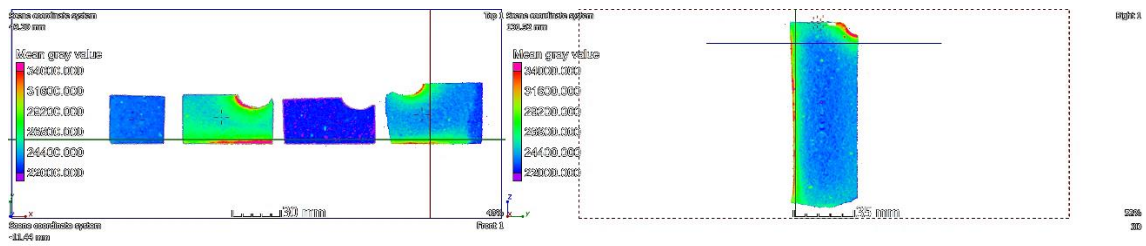


Bild 74: Schnitt Neutronentomografie Prüfkörper D(g) 90%

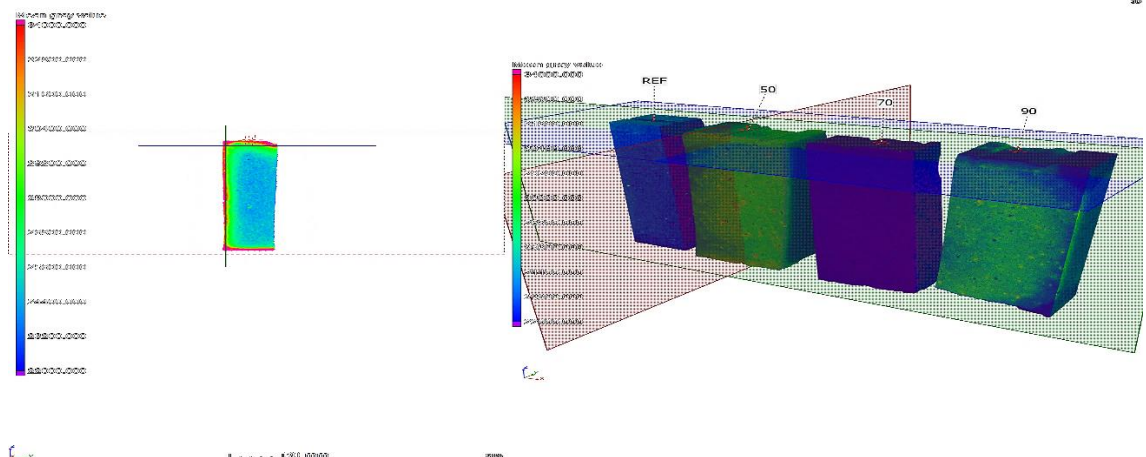
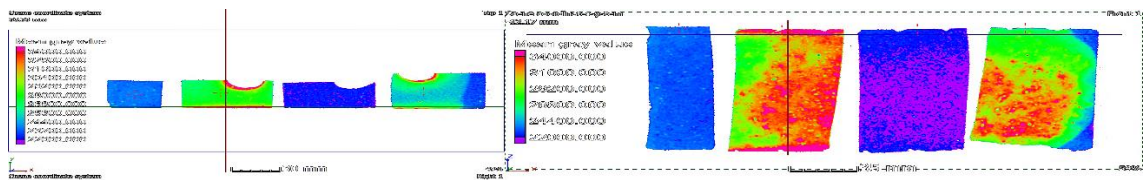


Bild 75: Schnitt Neutronentomografie Prüfkörper D(g) 50%

Studie b) Detaillierte Untersuchung der Verteilung von Grauwerten am Prüfkörper Ziegel

Nachfolgend wurde die Verteilung von Grauwerten etwas detaillierter betrachtet.

Mittels des vorgenannten Verfahrens wurden nachfolgende Prüfkörper untersucht:

- Ziegel Mz, Zuschnitt eines Vollziegels der Abmessungen 240x115x71mm
- Rohdichte 1,6 kg/m³
- IM: 1-K Kunstharz, Wirkprinzip hydrophobierend/porenverengend
- Bohrloch: horizontal
- Eingestellter D(g): 60%

Der vorgenannte Prüfkörper ist freundliche Leihgabe von R. Weischedel, Hochschule Wismar.

Anzumerken bleibt, dass der Prüfkörper infolge vorangegangener Untersuchungen gespalten wurde; dies lässt sich noch an aufgetretenen Rissbildungen im mittigen Bereich des Prüfkörpers wie auch im oberen rechten Bereich erkennen. Hinsichtlich der Aussagekraft bei der gegenständlichen Untersuchungsmethode ist jedoch kein Einfluss gegeben.

Hinsichtlich der vorgenannten Studie 2 lagen keine identischen Untersuchungsparameter vor, dahingehend sind die Studien 1 und 2 hinsichtlich der vorliegenden Grauwerte nicht vergleichbar.

Erkennbar sind ebenso wie bei Studie 1 unterschiedliche Grauwerte, welche farblich unterlegt wurden. In der Darstellung als Skalenteile entsprechen die nunmehr vorhandenen Farben unterschiedlichen Gehalten an IM. In dem nachfolgenden Beispiel werden hohe Grauwerte durch die Farbe Rot, mittlere Gehalte anhand der Farbe Grün und niedrige Gehalte durch die Farbe Blau dargestellt.

Möglich sind zudem unterschiedliche Ansichten dreidimensionaler Art; so lässt sich zum Beispiel ein Prüfkörper von verschiedenen Ansichten darstellen.

Zu dem nachfolgend vorgestellten Prüfkörper lässt sich grundsätzlich anmerken, dass sich aufgrund der Applikationsart das Bohrloch in der Mitte der schmalen Seite des Prüfkörpers befand. Dies liegt ungefähr auf der Höhe des Risses, welcher sich in der Hälfte des Prüfkörpers durch diesen komplett durchzieht. Der gegenständliche Prüfkörper ist ein Teilstück eines Prüfkörpers mit den ursprünglichen Abmessungen von ca. 240x115x71mm und wurde vertikal um etwa 3 cm verkleinert. Die anderen Abmessungen entsprechen dem ursprünglichen Prüfkörper.

Nachfolgend ist die Lage des Prüfkörpers skizzenhaft dargestellt:

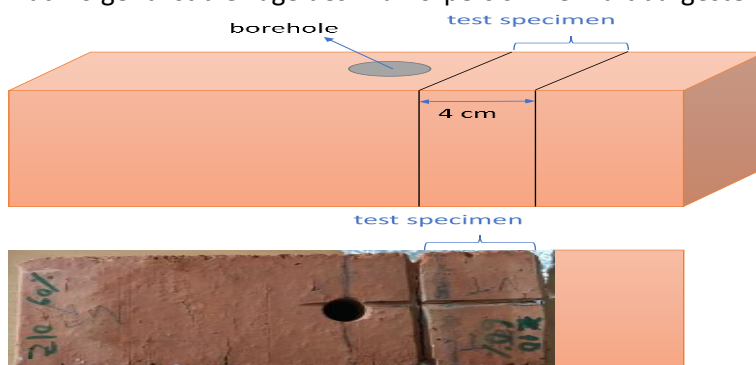


Bild 76: Lage des Prüfkörpers im Ziegel

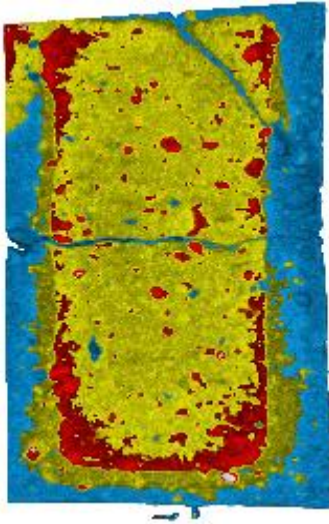


Bild 77: Frontansicht Prüfkörper

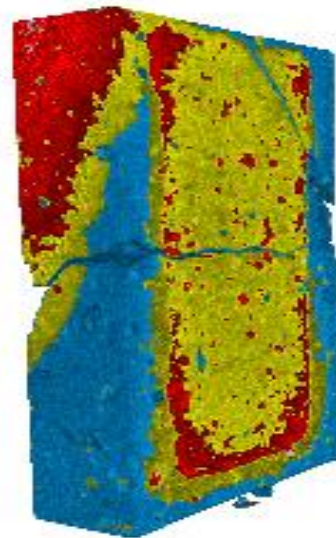


Bild 78: partielle Seitenansicht
Prüfkörper

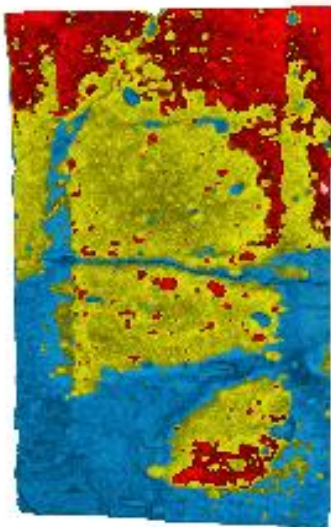


Bild 79: Rückansicht Prüfkörper

Bereiche hoher Grauwerte (rote Färbung) sind primär im oberen Bereich des Prüfkörpers zu finden, also der Bereich, welcher nach Beginn der Applikation zuerst mit dem IM in Kontakt kommt. In der partiellen Seitenansicht ist zudem erkennbar, dass die erhöhten Grauwerte sich nicht homogen im oberen Bereich des Prüfkörpers befinden, sondern einseitig verteilt sind. Dies mag Folge der Anordnung der Prüfkörper bei der IM-Applikation sein. So ist es möglich, dass bei Positionierung des Prüfkörpers auf der breiten Seite sich das IM nach Applikation einseitig ausbreitet. Erkennbar ist dies zudem an der Prüfkörper-Rückseite, welche geringere Grauwerte als die Vorderseite ausweist.

Erwartungsgemäß zeigt sich mit zunehmender Entfernung vom Bohrloch eine Abnahme von hohen Grauwerten (dargestellt durch gelbe Farbe) bis hin zu geringen Gehalten (blaue Farbe).

Augenscheinlich verläuft die Ausbreitung des IM hier nicht kreisförmig, sondern der Verlauf der Grauwerte lässt hier auf einen Verlauf des IM schließen, welcher annähernd konturenparallel zu den räumlichen Abgrenzungen des Prüfkörpers stattfindet. Auffällig sind hier auch Bereiche erhöhter Grauwerte (rote Färbung) zu den Randbereichen des Prüfkörpers hin, welche sich an einen Bereich mittlerer Grauwerte (gelbe Färbung) anschließen und einen saumförmigen Verlauf annehmen. An diese saumförmig verlaufenden Werte schließt sich zum Rand des Prüfkörpers wiederum eine Zone mit geringeren Grauwerten (gelbe Färbung) an.

Unter Zuhilfenahme der entsprechenden Software lässt sich hier ein durchschnittlicher Wert von ca. 1,6 cm für den saumförmigen Verlauf erhöhter Grauwerte ablesen.

Offenbar liegt hier eine Art Übergangzone vor, d.h. nach erfolgter Applikation breitet sich das IM mit abnehmender Konzentration aus (erkennbar an den abnehmenden Grauwerten). Jedoch bevor die Ausbreitung endet, befindet sich im parallelen Verlauf hierzu eine Zone mit höheren Grauwerten.

Eine lokale Änderung im Porensystem des Prüfkörpers, welcher annähernd parallel mit der Ausbreitung einher geht, ist eher als unwahrscheinlich anzusehen. Vielmehr ist die Ursache möglicherweise darin zu sehen, dass das IM Bestandteile aufweist, welche selektiv im Porensystem weitergeleitet werden. Ob denn mit mittleren Grauwerten noch eine Hydrophobie im Baustoff generiert werden kann, ist anhand der vorliegenden Daten nicht eindeutig erkennbar. Möglicherweise lässt anhand eines potentiellen selektiven Transportes ein Unterschied zwischen Ausbreitmaß und Wirkmaß eines IM erklären. Weitere durchgeführte Tests mittels der Neutronentomografie an behandelten Proben könnten hierzu noch detaillierte Angaben liefern.

Unter Zuhilfenahme geeigneter Software lassen sich zudem Schichtaufnahmen in verschiedenen Ebenen des Baustoffes darstellen. Bei dem vorgenannten Prüfkörper wurden zwei Ebenen beispielhaft dargestellt. Auf dem linken Bild ist jeweils der komplette Prüfkörper sichtbar mit der untersuchten Schnittebene. Auf dem rechten Bild ist die zugehörige Schnittebene als Querschnitt abgebildet.

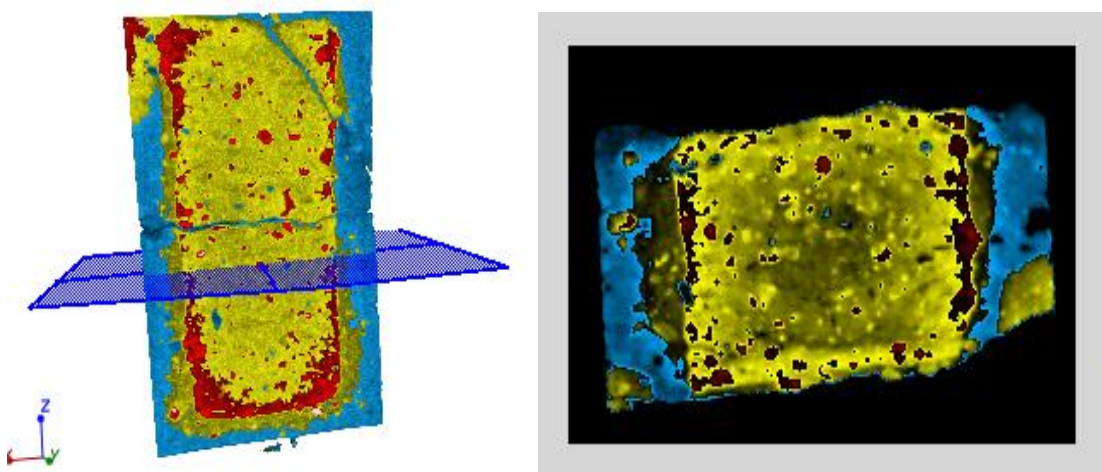


Bild 80 und 81: Lage obere Schnittebene und Tomografie Querschnitt

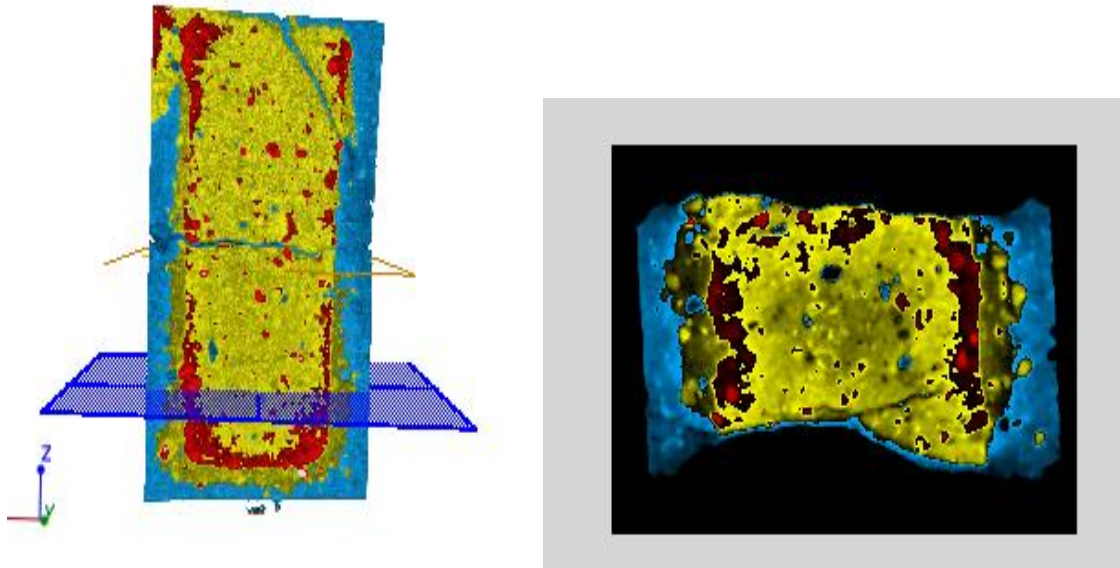


Bild 82 und 83: Lage untere Schnittebene und Tomografie Querschnitt

Aufgrund der Darstellung einer oberen und unteren Schnittebene im gleichen Prüfkörper lässt sich erkennen, dass - von außen nicht erkennbar – im Inneren des Prüfkörpers mittlere Grauwerte (gelbe Färbung) vorhanden sind, welche sich über die gesamte Breite des Prüfkörpers erstrecken. In Längsrichtung weisen beide Prüfkörper im Randbereich Areale niedriger Grauwerte auf (blaue Färbung). Auch im Inneren des Prüfkörpers setzt sich fort, was bereits bei der Ansicht erkennbar war: der Bereich mittlerer Grautöne ist von einem Bereich hoher Grautöne (rote Färbung) „umgeben“, während nachfolgend vollumfänglich der Bereich niedriger Grautöne (blaue Färbung) vorhanden ist.

6 Auswertung der Ergebnisse

6.1 Injektionsmittelapplikation

Grundsätzlich lässt sich bei allen durchgeführten Studien feststellen, dass mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad die Ausbreitung des IM abnimmt. Die Ausbreitung verhält sich demnach indirekt proportional zum ansteigenden Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ und zeigt anhand der durchgeführten linearen Regression vielfach einen deutlichen Zusammenhang. Nachfolgend wird auf die Ergebnisse noch einmal detailliert Bezug genommen.

Vorab sind die wichtigsten Ergebnisse noch einmal tabellarisch zusammengefasst, hinsichtlich der verwendeten IM ist die Tabelle farblich gegliedert.

Tab. 11: Zusammenfassung der Ergebnisse

	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Studie 4	Studie 5	Studie 6	Studie 7
Baustoff	Mörtel	Mörtel	Mörtel	Mörtel	Klinker	Ziegel/ KS-Stein	Ziegel/ KS-Stein
IM	1-K	1-K	Creme	Creme	1-K	1-K	Creme
A _{max} bei D(g)	53%*	0%	0%	0%	40%	40%-60%	0%
A _{min} bei D(g)	0%/100%	80%- 100%	100%*	>88%	0%	100%	100%
A _{max} (cm)	4,5	1,5	1,8	0,8	12	10	4
Nota					Temp. !		
B _A	5,6	1,8	2,25	1,0	15**	12,5	5

Anmerkungen:

*Ausbreitung bei 100% noch gegeben, ein positiver Abdichtungserfolg kann hierdurch nicht abgeleitet werden

* Daten bereinigt

** nur bedingt aussagekräftig wegen Applikation unter Anwendungsgrenze Temperatur

6.1.1 Verwendete Materialien

Kalk-Zement-Mörtel:

Bei den vorgestellten Studien 1 bis 4, welche alle den Baustoff Kalk-Zement-Mörtel repräsentieren, lässt sich grundlegend ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausbreitung und des Durchfeuchtungsgrades darstellen. Die Ausbreitung ist allen Studien, unabhängig vom verwendeten IM, sehr gering (zwischen 1 cm und 5 cm), so dass hier bei Ausführung des gemäß Literatur anzusetzenden Bohrlochabstandes zwischen 10 cm und 12 cm kein durchgehender Abdichtungsspiegel erreicht werden kann.

Die Ursache für die geringe Ausbreitung liegt im Baustoff selbst. Bereits werkseitig sind die verwendeten Werk trockenmörtel, welche lediglich mit Wasser angemischt werden müssen, wasserabweisend (w -Wert $< 0,5 \text{ kg/m}^{-2}\text{h}^{0.5}$) eingestellt und können somit insbesondere bei hohen Durchfeuchtungsgraden keine größere Aufnahme von IM-Mengen mehr leisten.

Die geringen Ausbreitmaße sind jedoch dahingehend zu relativieren, dass bei einer Verwendung am Bauwerk nicht nur Mörtel, welcher primär im Fugenbereich vorhanden ist, behandelt wird, sondern ein Verbund aus Mörtel und Ziegel vorliegt. Der Baustoff Ziegel hat sich hierbei in Voruntersuchungen als stärker saugend als Mörtel herausgestellt [6].

Die größte Ausbreitung des IM liegt, abgesehen von materialbedingten Schwankungen bei Studie 1, bei jeweils bei einem D(g) von 0%. Bei einem D(g) von 0% kann angenommen werden, dass das physikalisch gebundene Wasser durch den Trocknungsvorgang entfernt ist und der gesamte Porenraum für die Aufnahme eines IM zur Verfügung steht. Die Maximalwerte der Ausbreitung bei D(g) 0% sind hier unabhängig von dem verwendeten IM vorhanden. Es ist also nicht entscheidend, ob ein klassisches IM oder eine IM-Creme zur Anwendung kommt. Aufgrund dieser eindeutigen Tendenz kann zudem davon ausgegangen werden, dass die Aufnahme des IM im Baustoff Mörtel ohne das Vorhandensein einer gewissen „Grundfeuchte“ dargestellt wird.

Hinsichtlich der Ausbreitung bei einem D(g) von 100% ist keine klare Tendenz erkennbar. Während bei Mörtelproben unterschiedlicher Abbindezeiträume (Studie 2) bei einem D(g) von 100%

noch eine Ausbreitung, wenn auch in geringer Größenordnung (2 cm) ermittelt wurde, so lässt sich dies bei Studie 4 nicht belegen.

Obwohl Studie 4 eine geringere Rohdichte des Materials wie auch eine größere Porosität aufweist, ist die Ausbreitung der IM-Creme wesentlich geringer. Erwartungsgemäß würden eine höhere Porosität und auch eine geringere Rohdichte vermuten lassen, dass hier eine größere IM-Aufnahme stattfindet. Da die verwendeten Mörtelprodukte allesamt wasserabweisend eingestellt sind, ist dahingehend die Ursache hier wohl im verwendeten IM zu suchen. Ein verallgemeinernder Zusammenhang zwischen der jeweiligen Porosität des Prüfkörpers und der Ausbreitung kann nicht festgestellt werden.

Schlussfolgernd wurde herausgefunden, dass nicht nur der Baustoff, welcher behandelt wird, sondern auch das zur Verwendung kommende IM – neben dem vorherrschenden Durchfeuchtungsgrad - die Ausbreitung des IM beeinflusst. Die Abbindezeit eines Mörtels hingegen wirkt sich nur gering auf die Ausbreitung des IM aus.

Hinsichtlich der Mörtelprüfkörper ist anzumerken, dass die vorgestellten Studien an Prüfkörpern durchgeführt wurden, welche zeitnah vom Beginn der Studien hergestellt wurden (Abbindezeit 28 Tage). Gemäß der vorliegenden Ausführungen war zudem evident, dass der verwendete Werk trockenmörtel bereits werkseitig hydrophob produziert wurde und dahingehend die IM-Aufnahmen gering waren. Bei einer angedachten Ausführung an historischen, ggf. auch denkmalgeschützten Gebäuden ist jedoch davon auszugehen, dass zum einen bei Erstellung der jeweiligen Gebäude ein werkseitig hydrophobierter Baustoff noch gar nicht verfügbar war, so dass unter Umständen nicht mit einer reduzierten IM-Aufnahme zu rechnen ist. Zudem besteht die Möglichkeit, dass durch andauernde Witterungsexposition der Mörtel, welcher primär als Fugenmaterial verwendet wird, Änderungen der Konsistenz und damit auch der chemisch-physikalischen Eigenschaften erfahren hat und demzufolge ein geändertes Saugverhalten aufweist.

Ziegel/Klinker/Kalksand-Steine (KS-Steine)

Bei den verwendeten Baustoffen Ziegel, Klinker und KS-Steine lassen sich ähnlich wie bei dem Baustoff Mörtel Tendenzen der indirekten Proportionalität zwischen Durchfeuchtung und Ausbreitung des IM feststellen, wenn auch nicht in der gleichen Deutlichkeit wie beim Mörtel.

Auffallend ist jedoch die generell im Vergleich zu den Mörtelproben größere Ausbreitung des IM; eine Tendenz, die sich bei allen drei Studien zeigt. Ebenso zeigt sich eine Abhängigkeit der Ausbreitung von der Rohdichte des verwendeten Materials. Mit zunehmender Rohdichte, also einer einem kompakteren Gefüge, kann auch weniger IM aufgenommen werden. Obwohl die Rohdichte bei den Ziegel/Klinker- und KS-Steinen teils höher als diejenige der vorgenannten Mörtelproben ist, wird mehr IM aufgenommen. Dies ist wiederum eine Folge der bereits erwähnten werkseitig wasserabweisenden Einstellung des Werk trockenmörtels.

Wiederum zeigt sich, analog zu den Ergebnissen der Mörtelprüfkörper, bei der Applikation der IM-Creme noch eine geringfügige höhere Ausbreitung bei einem D(g) von 100%. Die Schwankung der Messwerte der IM-Ausbreitung bei Studie 6 ist möglicherweise auf eine inhomogene Verteilung der Feuchtigkeit bei der Einstellung des D(g) zurückzuführen, da wiederum in Studie 7 ein gleichförmiger Verlauf erkennbar ist. Folglich ist bei wechselnden Durchfeuchtungsgraden auch mit einer inhomogenen Ausbreitung des IM auf relativ begrenztem Raum auszugehen.

Hinsichtlich Studie 5 ist zu erwähnen, dass bei der Applikation des IM die vom Hersteller vorgegebenen Umgebungstemperaturen nicht eingehalten wurden und eine Auswirkung auf die Viskosität und damit auf die Ausbreitung des IM nicht ausgeschlossen werden konnte. Die Werte wurden dahingehend bereits bereinigt, weisen jedoch nach wie vor nur Tendenzen eines linearen Zusammenhanges auf. Festzuhalten bleibt, dass die unbedingte Einhaltung der Ausführungsanweisungen der Hersteller gewährleistet werden muss.

6.1.2 Injektionsmittel

Verwendet wurden gängige Injektionsmittel unterschiedlicher Hersteller, welche auf dem Markt erhältlich sind.

Unabhängig, ob es sich hierbei um ein „klassisches“ IM oder auch eine IM-Creme handelt, kann in Abhängigkeit vom verwendeten Baustoff von einer Ausbreitung des IM ausgegangen werden. Aufgrund der werkseitigen wasserabweisenden Einstellung des Werk trockenmörtels ist hier grundsätzlich ein Nachteil der Ausbreitung gegeben. Vorteile von IM aufgrund einer bestimmten Zusammensetzung konnten hierbei nicht festgestellt werden. Ebenso wenig lässt sich ein Vorteil der cremeförmigen Variante des IM im Vergleich zur klassischen Variante feststellen.

Hinsichtlich der seit einigen Jahren auch im Heimwerkerbereich erhältlichen IM-Cremes ist anzumerken, dass bei den hier durchgeführten Studien bei einem D(g) von 100% noch eine geringe Ausbreitung erkennbar war, jedoch grundsätzlich der gleiche Verlauf mit zunehmendem D(g) erkennbar ist, nämlich die Abnahme der Ausbreitung. Ob die Ausbreitung der IM-Creme über Kapillarporen oder anderweitig erfolgt, kann anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ebenso wenig ist sicher, dass die zwar vorhandene, jedoch ebenfalls rückläufige Ausbreitung bei D(g) ausreicht, um noch eine funktionsfähige Abdichtung zu generieren.

Die Beachtung der Umgebungstemperatur während der Ausführung ist unbedingt einzuhalten, da sich aufgrund nicht passender Temperatur Änderungen der Viskosität des IM ergeben können.

6.2 Modellierung der Injektionsmittelausbreitung

6.2.1 Grundlage der Modellierung

Gängiger Literatur ist zu entnehmen, dass neben der vorhandenen Mauerwerksdicke und der Art der verbauten Materialien auch der Durchfeuchtungsgrad eine Rolle spielt und ab einem Bereich von ca. 60% D(g) bereits nicht mehr mit einer Wirksamkeit von Abdichtungen mittels durchgeführter Injektionen gerechnet werden kann [13, 21].

Grundsätzlich werden IM-Applikationen jedoch bei hohen Durchfeuchtungsgraden >60% vorgenommen, so dass konsequenterweise die Ausbreitung eines IM bei diesen Durchfeuchtungsgraden näher zu beleuchten ist. Hierzu hat die Verfasserin in Gemeinschaft bereits eine Modellierung der Injektionsmittel-Ausbreitung publiziert [9], auf welche nachfolgend eingegangen wird.

Basis der Modellierung bildeten Untersuchungen an Ziegelprüfkörpern unterschiedlicher Durchfeuchtungsgrade, an welchen zwei unterschiedliche IM auf Kunstharzbasis appliziert wurden. Versuchsgrundlage bildete ebenfalls die Prüfvorschriften des Dahlberg-Institutes Wismar [18, 19].

Die visuelle Ausbreitung der jeweiligen IM wurde anhand eines Tropfenaufsetztest ermittelt, die sich nach erfolgter Applikation des IM einstellende Hydrophobie anhand Ermittlungen des

Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert) nach DIN EN ISO 15148. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zeigte sich ein relativ deutlicher Übergang des behandelten/nicht behandelten Bereiches anhand vorhandener Hydrophobie/Hydrophilie.



Bild 84: Prüfkörper nach erfolgtem Tropfenaufsetztest. Deutlich erkennbar ist das Verbleiben des Tropfens im hydrophobierten Bereich, während in der unbehandelten Region der Tropfen versiegt und in das Innere des Prüfkörpers weitergeleitet wird



Bild 85: Uneingeschränkter Transport von Wasser im nicht hydrophobierten Bereich des Ziegels nach Ermittlung des w-Wertes. Die Ausbreitung des IM erfolgte eher konzentrisch, der Prüfkörper wurde jedoch rechteckig zugeschnitten. Infolge des Anteiles nicht hydrophobierter Bereiche erfolgte uneingeschränkte Wasseraufnahme

Nachfolgend sei die Modellierung anhand der zugrunde liegenden Werte erklärt. Folgende Werte wurden hinsichtlich der Ausbreitung an den untersuchten Ziegelprüfkörpern ermittelt:

Tab. 12: Ermittelte Werte Ausbreitung IM A und IM B

Jeweiliger D(g)	Ausbreitung A _D IM A in cm	Ausbreitung A _D IM B in cm
0%	5,5 (= A _{max})	10,5 (= A _{max})
10%	4,9	10,2
20%	4,6	9,9
30%	4,4	9,7
40%	4,0	9,5
50%	3,8	9,3
60%	3,5	9,0
70%	3,4	8,8
80%	3,4	8,5
90%	3,4	8,3

Verwendet wurden bei den vorgenannten Untersuchungen zwei IM auf Kunstharzbasis; bei IM A handelt es sich um ein einkomponentiges Kunstharz mit hydrophobierend /porenverengendem Wirkprinzip, während es sich bei IM B um einen einkomponentigen Kunstharz-Kautschuk mit hydrophobierendem Wirkprinzip handelt. Erkennbare Unterschiede hinsichtlich weiterer chemisch-physikalischer Parameter bestehen nicht.

Wie anhand der Ausbreitung der beiden IM aus obiger Tabelle ersichtlich ist, differieren die Ausbreitungsradien doch erheblich, obwohl nur geringe Unterschiede hinsichtlich der chemisch-physikalischen Beschaffenheit der beiden IM bestehen. Dahingehend ist eine verallgemeinernde Übertragung von Ergebnissen hinsichtlich einer Anwendung am Gebäude kritisch zu diskutieren.

Um den vorgenannten Zusammenhang der vorgenannten Ausbreitung des IM mit den vorherrschenden Durchfeuchtungsgraden darzustellen, kann das Modell der linearen Regression herangezogen werden.

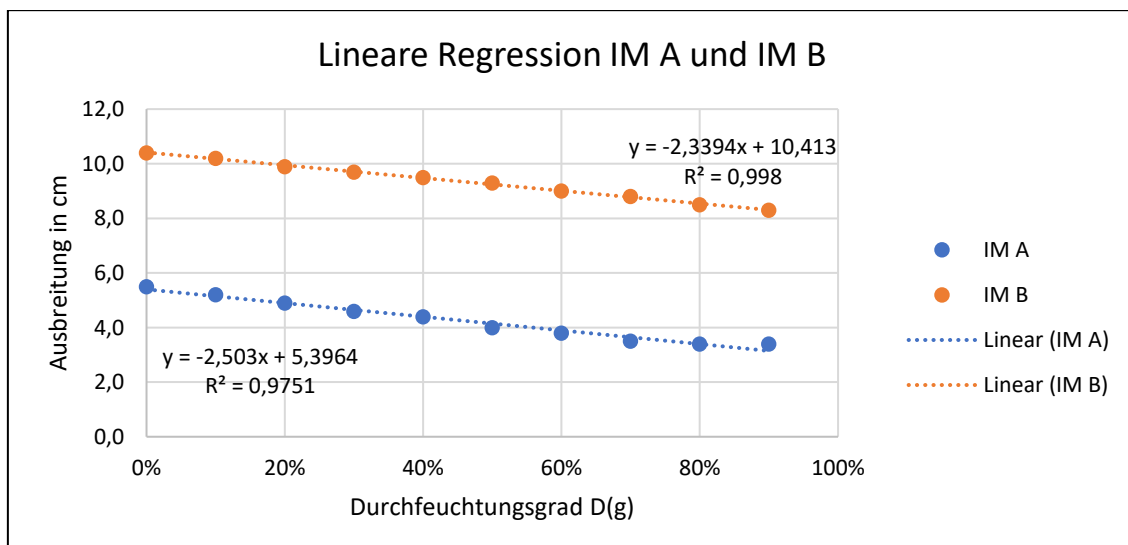


Bild 86: Lineare Regression IM A und IM B

Unter Berücksichtigung der für beide Bereiche ermittelten Durchfeuchtungsgrade wie auch der feuchteabhängigen Ausbreitung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$k_{im} = \frac{A_{D1} - A_{D2}}{D_2 - D_1} \quad (9)$$

Zur Veranschaulichung ist der folgende Zusammenhang grafisch dargestellt:

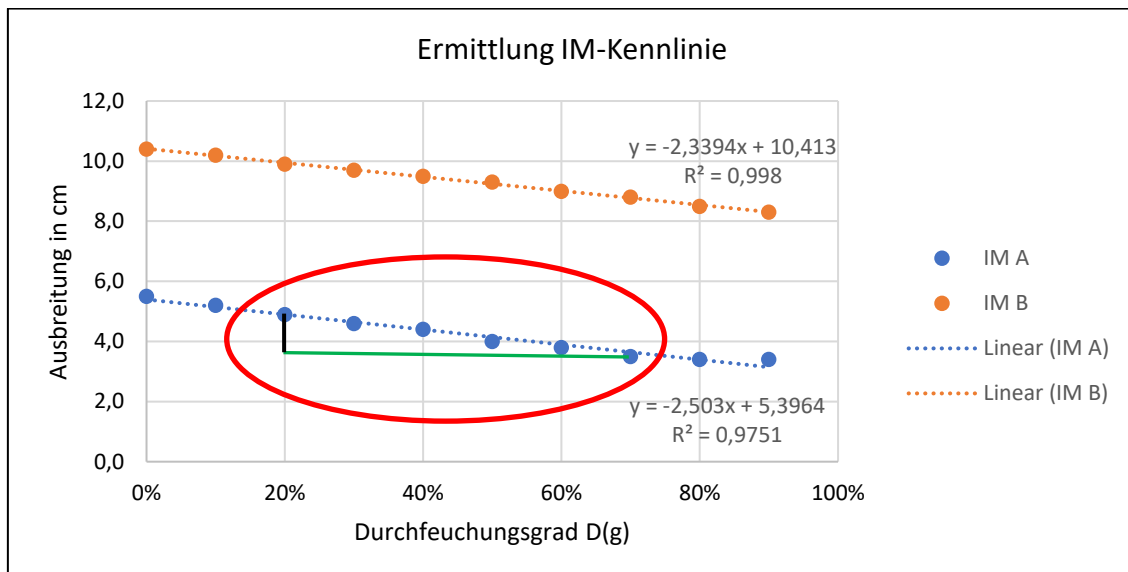


Bild 88: Lineare Regression IM und IM B [6]. Die grüne Gerade markiert hierbei die horizontale Distanz, die schwarze Gerade die vertikale Distanz.

Der Quotient aus vertikaler Distanz und horizontaler Distanz bildet hierbei die Steigung der Geraden. Beispielhaft lässt sich somit unter Berücksichtigung des Wertes 5 der obigen Grafik wie auch eines Wertes von 1 für die vertikale Distanz eine IM-Permeabilität wie folgt errechnen:

$$k_{im} = -\frac{1}{5} = -0,2$$

Gemäß der vorgenannten Gleichung (xx) lässt sich somit auch A_{max} rechnerisch ermitteln:

$$A_{max} = -k_{im} \cdot D(g) + A_D \quad (10)$$

und nach Einsetzen der entsprechenden Werte:

$$A_{max} = (-0,2 \cdot 0,1 + 5,5) \text{ cm}$$

ergibt sich als maximale Ausbreitung eines IM $A_{max} = 5,48 \text{ cm}$, also gerundet 5,5 cm

Zudem lässt sich anhand der vorgenannten Modellierung die maximale Ausbreitung eines IM auch grafisch ermitteln. Oftmals liegen hinsichtlich der Ermittlung der Ausbreitung eines IM nicht immer Werte über die entsprechenden Durchfeuchtungsgrade im Bereich 0% bis 100% vor.

Da anhand der vorgenannten Werte von einem linearen Verlauf des Zusammenhangs Ausbreitung und Durchfeuchtungsgrad ausgegangen werden kann, bietet es sich an, durch die vorhandenen Werte eine Gerade zu legen und durch Extrapolation einen weiteren linearen Verlauf vorzunehmen. Am Schnittpunkt der extrapolierten Geraden mit der Ordinate lässt anhand der Skalierung der Ordinate anschließend der Werte der maximalen Ausbreitung ermitteln.

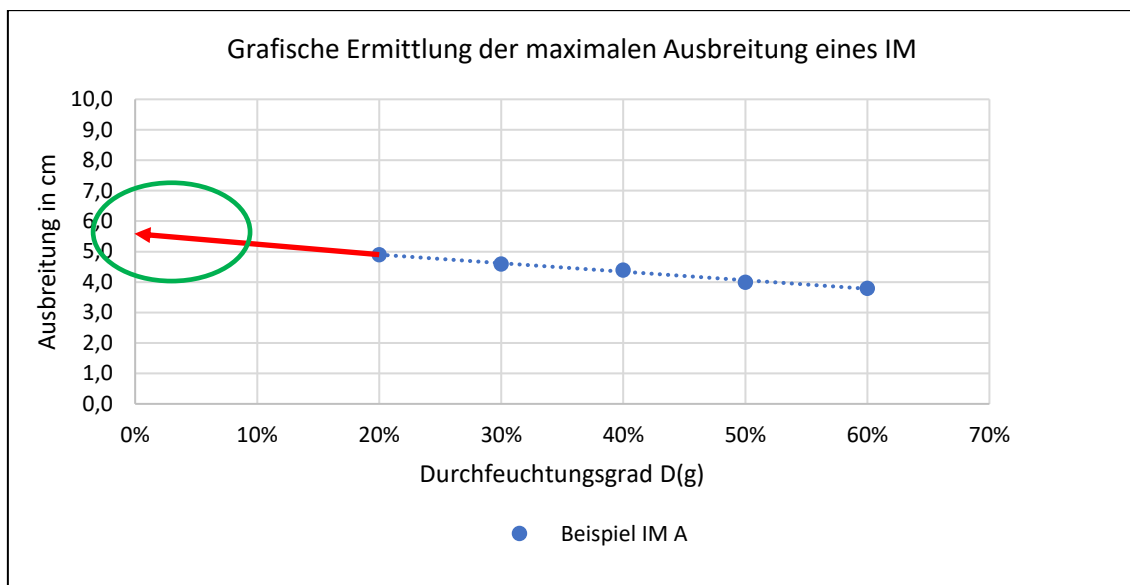


Bild 89: Grafische Ermittlung der maximalen Ausbreitung eines IM

Die rote Gerade stellt sozusagen eine Verlängerung der Gerade dar, welche sich aus dem bisherigen Verlauf anhand der ermittelten Werte ergibt (Extrapolation). Demzufolge würde die maximale Ausbreitung von IM A bei 5,5 cm liegen. Ein Abgleich mit dem rechnerisch ermittelten Wert von (ca. 5,5 cm) sowie dem ursprünglich gemessenen (Tab. Xx) ergibt hier umfangreiche Übereinstimmung.

Grundsätzlich sind die anzusetzenden Bohrlochabstände relevant für den Abstand der einzelnen Ausbreitungsradien nach erfolgter IM-Applikation [6]. Unter Berücksichtigung der vorgenannten feuchteabhängigen Ausbreitung des IM sind demzufolge auch die Bohrlochabstände anzupassen.

Bei Kenntnis der Ausbreitung des IM, der verwendeten Baustoffe sowie des IM lässt sich folgende Überlegung anstellen: zur Sicherstellung eines flächigen Ausbreitungsspiegels ist es erforderlich, dass sich die Ausbreitungsradien des IM zu einem bestimmten Teil überschneiden. Diese Überschneidung ist dahingehend darzustellen, dass zum einen ein weiteres Aufsteigen von Feuchte unterbunden wird und andererseits der Abstand der Bohrlöcher so groß gewählt wird, dass eine Ausführung wirtschaftlich vertretbar ist. Zudem ist sicherzustellen, dass aufgrund zu kleiner Bohrlochabstände keine statischen Probleme generiert werden.

Nachfolgende Skizze veranschaulicht die vorgenannten Ausführungen [7]:

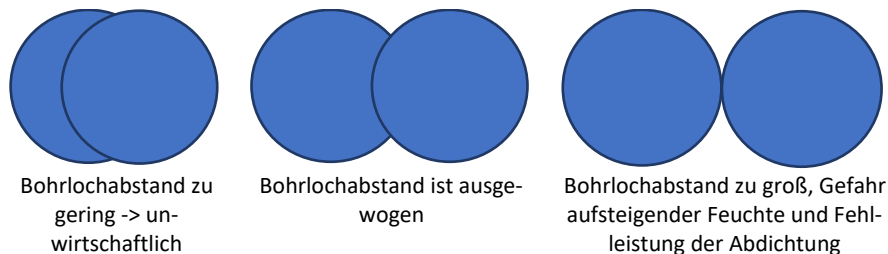


Bild 90: Überlegungen hinsichtlich des zu wählenden Bohrlochabstandes

Zur Gewährleistung einer funktionsfähigen Abdichtung ist – unabhängig vom vorhanden Durchfeuchtungsgrad – eine gleichmäßige Überlappung der Ausbreitungsradien des IM sicherzustellen. Es empfiehlt sich, bei Kenntnis der jeweiligen Ausbreitung des IM bei einem bestimmten $D(g)$ hierfür einen konstanten Faktor anzusetzen.

Gemäß WTA-Merkblatt sind hinsichtlich der Ausführung einer IM-Abdichtung Bohrlochabstände im Bereich zwischen 10 cm und 12,5 cm einzuhalten, um eine funktionsfähige Abdichtung zu erstellen; bei Annahme eines Bohrlochabstandes von 12 cm müsste sich das IM um jedes Bohrloch ca. 6 cm ausbreiten.

Grundsätzlich sollten sich demnach folgende Informationen aus der Grafik ablesen lassen:

- Beim Schnittpunkt der jeweiligen Kennlinie mit der 6cm-Linie sollte sich an der Abszisse der Durchfeuchtungsgrad ablesen lassen, bis zu welchem mit einer ausreichenden Ausbreitung des IM zu rechnen ist (maximaler Einsatzbereich des IM)
- Bei Kenntnis des entsprechenden Durchfeuchtungsgrades kann über den Schnittpunkt mit der Kennlinie an der Ordinate der entsprechende Bohrlochabstand abgelesen werden, der hinsichtlich einer funktionsfähigen Abdichtung einzuhalten ist

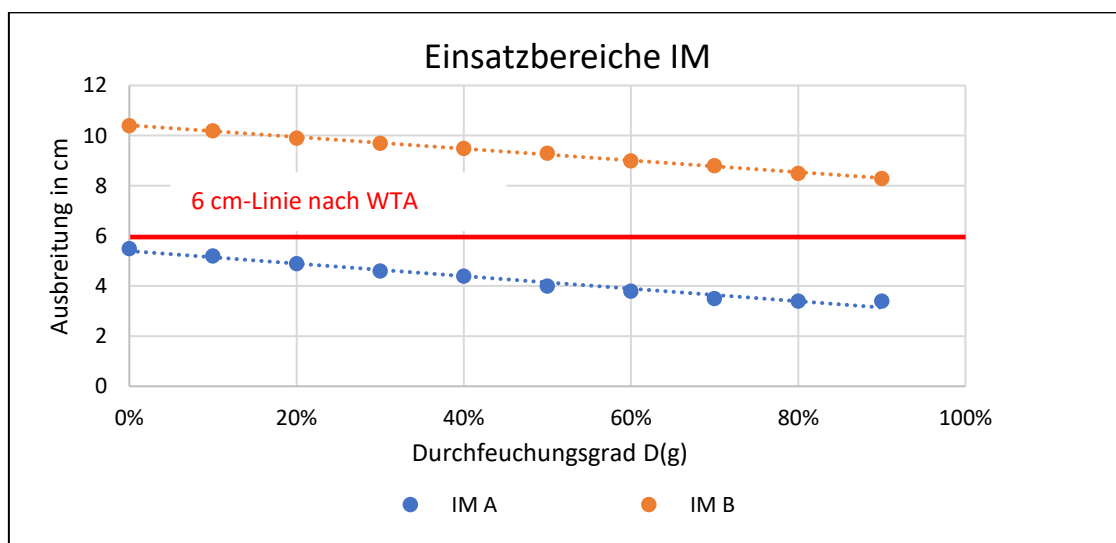


Bild 91: Einsatzbereiche verwendeter IM gemäß der 6cm-Linie nach WTA.

Bei genauer Hinsicht fällt jedoch auf, dass bei IM A aufgrund der geringeren Ausbreitung über das gesamte Spektrum der Durchfeuchtungsgrade zwischen 0% und 100% kein Schnittpunkt mit der Kennlinie möglich ist. Die Ursache hierfür ist darin zu setzen, dass die 6cm-Linie zu hoch angesetzt wurde; d.h. bei diesem Abstand ist keine funktionsfähige Abdichtung möglich.

Hinsichtlich IM B findet ebenfalls kein Schnittpunkt zwischen der Kennlinie und der 6cm-Linie statt. Die Ausbreitung des IM ist über alle $D(g)$ ausreichend, so dass hier weder der Durchfeuchtungsgrad noch eine IM-Ausbreitung von 6 cm als limitierender Faktor angesehen werden kann.

6.2.2 Beispielhafte Anwendung der Modellierung

Wie vorab erwähnt, basiert die vorab vorgestellte Modellierung auf eigenen Voruntersuchungen [6]. Nunmehr soll die Modellierung an einer vorab vorgestellten Studie (hier Studie 7) beispielhaft angewendet werden, um zum einen die Plausibilität, zum anderen auch die Bedeutung der Modellierung für die Baupraxis darzustellen.

Da erfahrungsgemäß der Baustoff Ziegel in einem in der Baupraxis vorkommenden Verbund als wasser- und damit auch IM-leitendes Medium angesehen wird, wurde exemplarisch eine Studie mit Ziegelproben zur Veranschaulichung herangezogen. Zur besseren Veranschaulichung wurde die nachfolgende Studie ausschließlich auf Mischwerte der erhaltenen Untersuchungsergebnisse für Ziegel abgestellt. Der Wert der Ausbreitung bei $D(g)$ 0% wurde aufgrund mangelnder Plausibilität nicht berücksichtigt. Dahingehend ist aufgrund der hohen Korrelation eine hohe lineare Abhängigkeit der beiden Parameter erkennbar.

Die in Studie 7 ermittelten Untersuchungswerte für Ziegelprüfkörper lassen sich wie folgt darstellen:

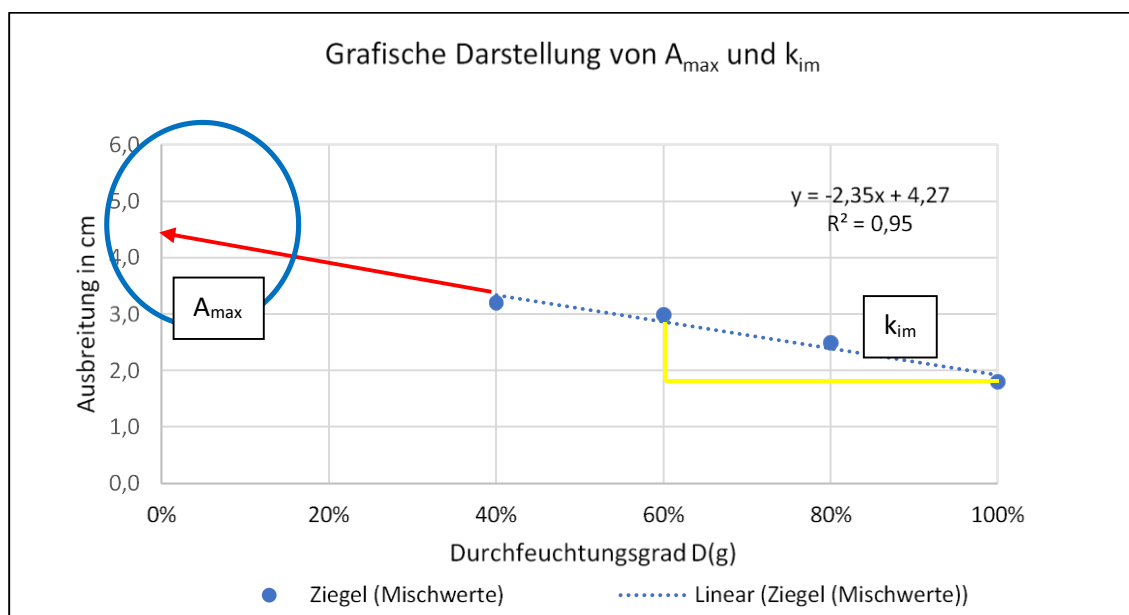


Bild 92: Grafische Ermittlung der Werte für A_{max} und k_{im}

Wie bereits erwähnt, lässt sich gemäß vorgenannte Ausführungen ein linearer Zusammenhang zwischen der bestehenden Durchfeuchtung wie auch der IM-Ausbreitung wie folgt darstellen:

Wie in den Grundlagen in Punkt 6.2.1 ausgeführt, lässt sich k_{im} aus dem Quotienten (siehe obiges gelbes Dreieck) der vertikalen und der horizontalen Distanz berechnen:

$$k_{im} = - \frac{1,2}{40} = - 0,03 \text{ cm/\%}$$

Unter Einsetzen der ermittelten Variablen in die obige Gleichung ergibt sich für einen beispielhaft gewählten $D(g)$ von 60% somit folgende Gleichung:

$$A_{max} = A_D - k_{im} D(g) = 3 \text{ cm} - (- 0,03 \text{ cm/\%} \cdot 40\%) = 4,2 \text{ cm}$$

Hinsichtlich des Einsatzbereiches des anzusetzenden Bohrlochabstandes werden die derzeit gemäß des WTA-Merkblattes 04-10 [16] anzusetzenden Bohrlochabstände zwischen 10 cm und 12,5 cm (bzw. 5 cm – 6 cm als halber Bohrlochabstand) als Anhaltspunkt verwendet.

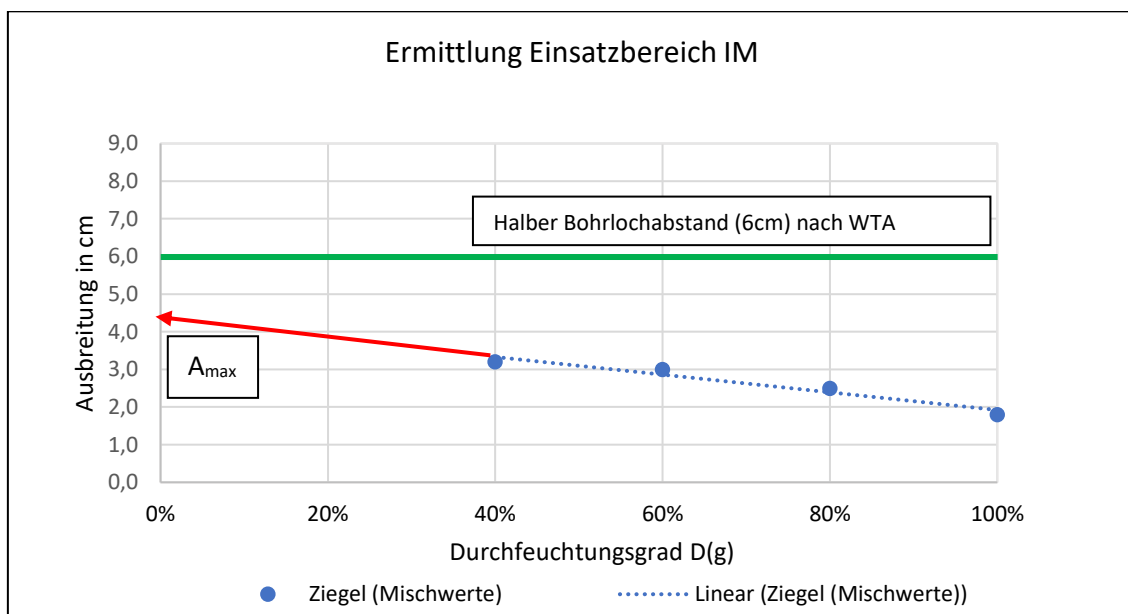


Bild 93: Gegenüberstellung der Untersuchungswerte mit dem nach dem WTA-Merkblatt anzusetzenden Bohrlochabstand. Unter Zugrundlegung eines Bohrabstandes nach WTA wäre bei Anwendung am Objekt mit einer Fehlleistung zu rechnen gewesen.

Anhand des Bildes ist eindeutig erkennbar, dass bei Ansetzen eines halben Bohrlochabstandes von 6 cm nach dem WTA-Merkblatt aufgrund der geringen Ausbreitung des IM im Ziegel keine funktionsfähige Ausbreitung erreicht werden kann. Auch bei grafisch ermittelter maximaler Ausbreitung eines IM bei einem $D(g)$ von 0%, der einem getrockneten Prüfkörper entspricht und bei welchem theoretisch der gesamte Porenraum für die Aufnahme eines IM zur Verfügung steht, liegt der ermittelte Wert darunter und wäre bei Ausführung am Gebäude mit einer Fehlleistung zu rechnen. Dies impliziert auf der anderen Seite, dass die Angaben zu dem vorgenannten Bohrlochabstand als zu groß bewertet werden müssen.

Folgende Überlegungen lassen sich unter nochmaliger Einbeziehung der vorangegangenen Grafik hinsichtlich eines Bohrlochabstandes anstellen:

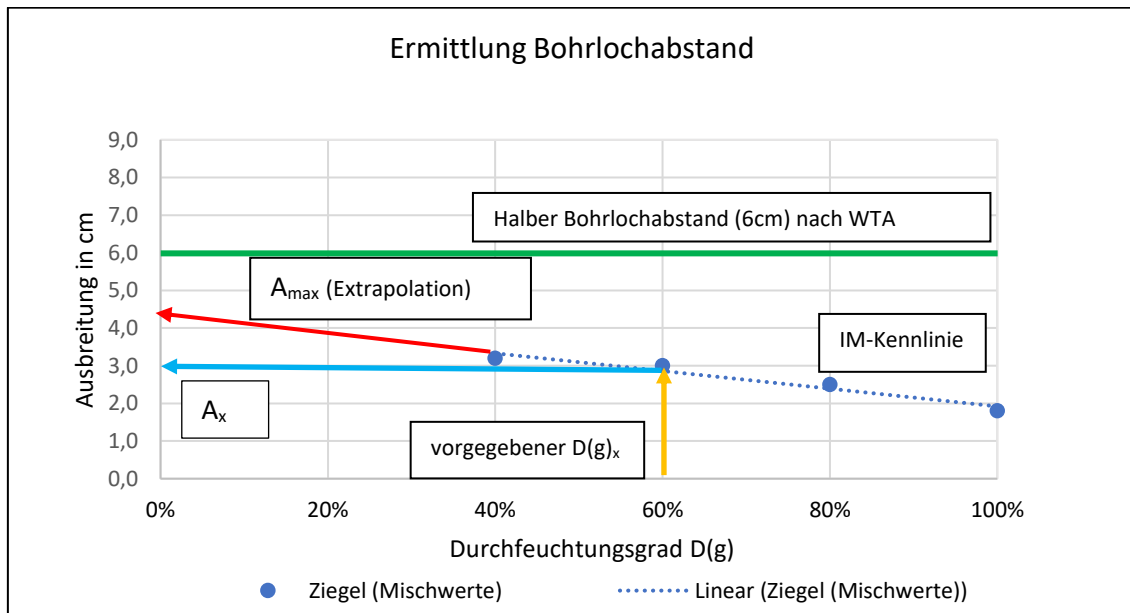


Bild 94: Grafische Überlegungen zum Bohrlochabstand

Erklärung:

- die IM-Kennlinie (hier blau gepunktet) wird als bekannt vorausgesetzt. Bei fehlenden Werten kann durch Extrapolation der Wert A_{max} grafisch ermittelt werden (rote Gerade, entspricht dem Schnittpunkt der IM-Kennlinie an der Ordinate bei $D(g)$ 0%)
- bei Annahme von beispielsweise einem Durchfeuchtungsgrad von 60% kann in vertikaler Richtung (orange Gerade) ein Schnittpunkt mit der IM-Kennlinie abgelesen werden
- dieser Schnittpunkt stellt bei Ablesen auf der Ordinate (horizontaler Schnittpunkt, gekennzeichnet durch die türkise Gerade) die Ausbreitung des IM bei den gewählten $D(g)$ 60% dar, in diesem Falle 3 cm.

Für den anzusetzenden Bohrlochabstand ist jedoch weiters zu unterscheiden und damit zu quantifizieren:

- theoretischer Bohrlochabstand $B_{theor.}$
Ein theoretischer Bohrlochabstand $B_{theor.}$ lässt sich als zweifache Ausbreitung ($2A_D$), beidseitig des Bohrloches) definieren.
Bei dem vorgenannten Beispiel von $D(g)$ 60% wäre von einem Bohrlochabstand $B_{theor.} = 2 \times 3 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$ auszugehen.

$$B_{theor} = 2 A_D \quad (11)$$

- praktischer Bohrlochabstand $B_{prakt.}$
Da sich jedoch gemäß der vorangegangenen Ausführungen ein Teilbereich der Ausbreitungsradien überlappen muss, um nachfolgend aufsteigende Feuchte zu verhindern, ist dahingehend ein „Sicherheitsabzug“ zu berücksichtigen. Dieser wird unter technisch sinnvollen und wirtschaftlichen Aspekten mit 20% bewertet.

Dahingehend ist der zweifache Ausbreitungsradius als theoretischer Bohrlochabstand um 20% zu reduzieren (d.h. $\frac{4}{5}$) oder andersherum: der zweifache Bohrlochabstand ist mit Faktor 0,8 zu multiplizieren.

Bei Beibehaltung des obigen Beispiels würde sich der Bohrlochabstand wie folgt errechnen:
 $B_{\text{prakt}} = 0,8 \cdot 2A_D = 0,8 \cdot 6 \text{ cm} = 4,8 \text{ cm}$

$$B_{\text{prakt}} = B_{\text{theor.}} \cdot 0,8 \quad (12)$$

Unter Bezugnahme auf den von der WTA angesetzten Bohrlochabstand von 10 cm bis 12,5 cm, welcher als 6 cm-Linie (halber Bohrlochabstand wegen Berücksichtigung einer Seite der Ausbreitung) in vorangegangener Grafik enthalten ist, wäre mit einer Fehlleistung der zu rechnen gewesen.

Selbst bei einem D(g) von 0%, was einem getrockneten Baustoff mit maximal möglicher Aufnahmemöglichkeit für IM entspricht, wäre der vorgegebene Bohrlochabstand zu groß gewesen.

Der Vorteil der vorgestellten Modellierung ist als Novum eine feuchteabhängige Berechnung des Bohrlochabstandes, welcher quantifizierbar ist. Unter Einbeziehung eines sogenannten „Sicherheitsabzugs“ von 20% ist zudem eine ausreichende Überlappung der Ausbreitungsradien zum nachfolgenden Unterbinden aufsteigender Feuchte sichergestellt.

Nachfolgenden Tabelle sind die Kennwerte der Modellierung nochmals zusammengefasst und anhand eines Beispiels detailliert erläutert.

Tab. 13: Zusammenstellung der Kennwerte zur Modellierung mit Beispiel

Kennwert/Formel		Berechnung anhand Beispiel
		Beispiel: D(g) ₁ : 40 %, A ₁ : 5,0 cm D(g) ₂ : 80 %, A ₂ : 2,0 cm
	$A_{\text{max}} = A_D - k_{\text{im}} D(g)$	<ul style="list-style-type: none"> grafische Ermittlung der IM-Geraden mit den beiden Punkten P₁ (40%/5,0 cm) und P₂ (80%/2,0 cm) durch Extrapolation der Geraden bei einem D(G) von 0% (Schnittpunkt mit der Ordinate) ist A_{max} grafisch ermittelbar A _{max} = 7,9 cm
k_{im}	IM-Permeabilität $k_{\text{im}} = \frac{A_{D1} - A_{D2}}{D_2 - D_1}$	$k_{\text{im}} = \frac{(5-2) \text{ cm}}{(80 - 40) \%} = 0,075 \text{ cm/\%}$ k _{im} als IM-Permeabilität gibt an, um wieviele cm sich die IM-Ausbreitung reduziert, wenn der D(g) um 1% steigt Für A _k folgt: $A_k = k_{\text{im}} D(g) = \frac{2}{5} \text{ cm/\% } D(g)$ Beispiel 1: D(g) = 60% Korrektur: A _k = 60 x 0,075 cm = 4,5 cm Beispiel 2: D(g) = 40% Reduktion: A _k = 40 x 0,075 cm = 3,0 cm Beispiel 3: D(g) = 20%

		Reduktion: $A_k = 20 \times 0,075 \text{ cm} = 1,5 \text{ cm}$
A_D	Feuchteabhängige Ausbreitung A_D $A_D = A_{\max} - A_k = A_{\max} - k_{\text{im}} \cdot D(g)$	<p>Beispiel 1: $D(g) = 60\%$ d.h. es verbleiben $A_D = A_{\max} - A_k = 5 \text{ cm} - 4,5 \text{ cm} = 0,5 \text{ cm}$</p> <p>Beispiel 2: $D(g) = 40\%$ d.h. es verbleiben $A_D = A_{\max} - A_k = 5 \text{ cm} - 3,0 \text{ cm} = 2,0 \text{ cm}$</p> <p>Beispiel 3: $D(g) = 20\%$ d.h. es verbleiben $A_D = A_{\max} - A_k = 5 \text{ cm} - 1,5 \text{ cm} = 3,5 \text{ cm}$</p>
B_{theor}	Theoret. Bohrlochabstand (ohne Sicherheitsabzug) $B_{\text{theor}} = 2 A_D$ $B_{\text{theor}} = 2 [A_{\max} - k_{\text{im}} \cdot D(g)]$	<p>$B_{\text{theor}} = 2 A_D$</p> <p>Beispiel 1: 1,0 cm</p> <p>Beispiel 2: 4,0 cm</p> <p>Beispiel 3: 7,0 cm</p>
B_{prakt}	Praktischer Bohrlochabstand $B_{\text{prakt}} = B_{\text{theor}} \cdot 0,8 A_D$ (mit Sicherheitsabzug, auszuführende Variante)	<p>$B_{\text{prakt}} = 0,8 B_{\text{theor}}$</p> <p>Beispiel 1: 0,8 cm</p> <p>Beispiel 2: 3,2 cm</p> <p>Beispiel 3: 5,6 cm</p>

Das vorgenannte Beispiel lässt sich wie folgt grafisch darstellen:

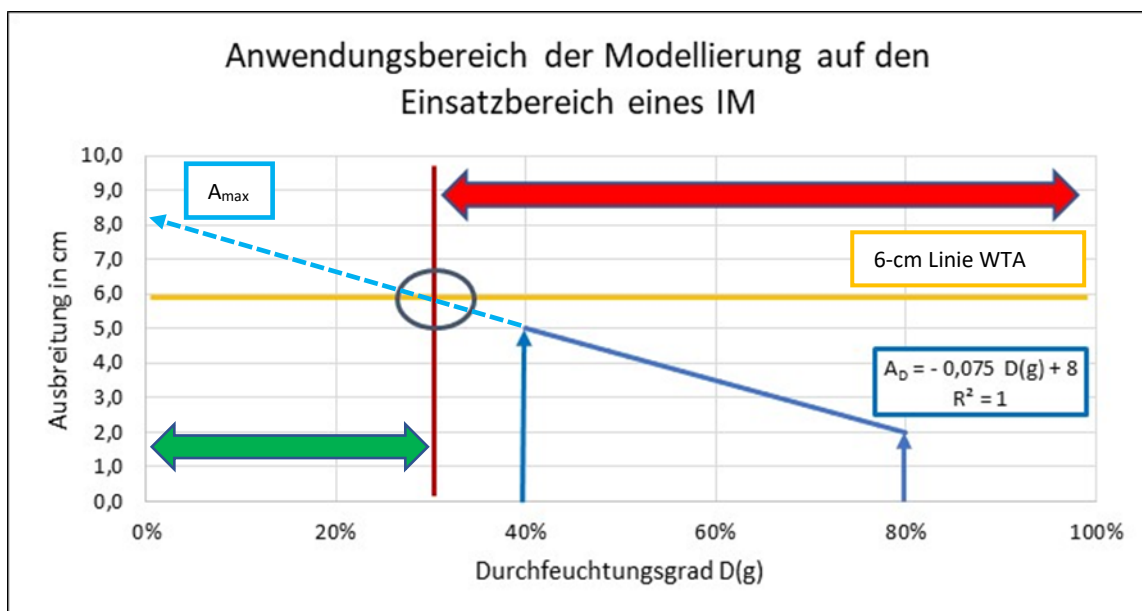


Bild 95: Anwendung der Modellierung auf den Einsatzbereich eines IM

Aus der Grafik lassen sich folgende neue Erkenntnisse ableiten:
Durch Festlegung zweier Punkte (P_1 , P_2) lässt sich die IM-Kennlinie generieren, mittels Extrapolation ist bei einem $D(g)$ von 0% der Wert von A_{\max} feststellbar.

Die 6 cm-Linie nach WTA [16], welche hinsichtlich des Bohrlochabstandes zu berücksichtigen ist, schneidet etwa bei einem $D(g)$ von 30% die IM-Kennlinie (blauer Kreis). Die hohe Korrelation (R^2) spiegelt hierbei die hohe Abhängigkeit der beiden Parameter wieder.

Ausgehend von der Annahme, dass die WTA-Kennlinie hinsichtlich einer Funktionsfähigkeit einer Abdichtung von den Ausbreitungswerten nicht unterschritten werden soll, wäre gemäß der obigen Grafik eine funktionsfähige Abdichtung nur bis zu einem $D(g)$ von ca. 30% gegeben.

Relevanz der Modellierung für die Baupraxis:

Es empfiehlt es sich, vor Ausführung der Abdichtung aus zwei unterschiedlichen Abdichtungsebenen Bohrkerne zu entnehmen und die Aufnahmefähigkeit des Baustoffes hinsichtlich des IM zu überprüfen. Hierzu können die vorgestellten Untersuchungsmethoden wie beispielsweise die w -Wert-Bestimmung herangezogen werden. Unter Zuhilfenahme der oben genannten Modellierung kann überprüft werden, bis zu welchem Durchfeuchtungsgrad mit einer Funktionsfähigkeit der Abdichtung gerechnet werden kann.

6.3 Kernphysikalische Untersuchungen

Die angewendeten kernphysikalischen Verfahren der Neutronenradiografie wie auch der Neutronentomografie, liefern als zerstörungsfreie Verfahren auf einzigartige Weise Informationen hinsichtlich der Ausbreitung eines Injektionsmittels im Inneren eines Prüfkörpers. Mittels Visualisierung der enthaltenen IM-Gehalte lassen sich somit unter Zuhilfenahme der entsprechenden Software (VG Studio) Aussagen über die generelle Verteilung eines IM im Baustoff als auch in einzelnen Ebenen tätigen.

Auch hier zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei den vorgestellten Studien, nämlich die feuchteabhängige Ausbreitung eines IM in einem Prüfkörper. Das heißt folglich, dass der zum Zeitpunkt der Applikation eines IM am Bauwerk vorherrschende Durchfeuchtungsgrad einen ausschlaggebenden Einfluss auf die IM-Ausbreitung hat. Dies ließ sich anhand der Visualisierung der Verteilung eines IM in einem Prüfkörper eindeutig darstellen. Folglich sind entsprechende Voruntersuchungen des Bauwerks, an dem eine Applikation stattfinden soll, unumgänglich, um eine ausreichende Ausbreitung eines IM sicherzustellen.

Des Weiteren war erkennbar, dass sich das IM in keinem der untersuchten Prüfkörper nach Applikation homogen ausgebreitet hat bzw. waren keine gleichmäßig in Abhängigkeit von der Entfernung vom Bohrloch abnehmenden Gehalte, dargestellt durch die erhaltenen Grauwerte, erkennbar. Stattdessen konnten Bereiche lokaler Anreicherung von IM festgestellt werden, die auch als kleine „IM-Inseln“ bezeichnet werden können. Ob diese durch das IM selbst bedingt sind oder aus kleinen Inhomogenitäten der Bestandteile des Ziegels herrühren, ist auf Basis der durchgeführten Untersuchungen nicht feststellbar.

Ebenso konnte anhand der Untersuchungen gezeigt werden, dass in den Randbereichen der Ausbreitung im Abstand von ca. 1,5 cm sich ein Bereich erhöhter Anreicherung von IM abzeichnet, welcher vom Verlauf her der allgemein konzentrisch verlaufenden Ausbreitung folgt. Offenbar handelt es sich um eine Art „Übergangszone“, in welcher sich IM verstärkt anreichert. Ob die Wirksamkeit, d.h. die Ausbildung eines hydrophoben Effektes auch in diesen Bereichen vollumfänglich gegeben ist, ist anhand weiterer Untersuchungen zu klären.

6.4 Auswirkungen der Untersuchungsergebnisse auf die Ausführung der nachträglichen horizontalen Abdichtung mittels druckloser IM-Applikation

Bei den vorgestellten Studien zeigt sich hinsichtlich des Verlaufs der IM-Ausbreitung eine nachvollziehbare Abnahme der IM-Ausbreitung mit zunehmendem Durchfeuchtungsgrad, unabhängig vom verwendeten Baustoff und appliziertem IM. Bei Durchfeuchtungsgraden ab ca. 60% ist bereits mit einer rückläufigen Abnahme des IM zu rechnen, bei hohen Durchfeuchtungsgraden von 80%-100% findet oftmals überhaupt keine IM-Aufnahme mehr statt.

Unter diesen Voraussetzungen hätten bei einer Applikation am Bauwerk in den wenigsten Fällen eine funktionsfähige Abdichtung erstellt werden können, zumal auch die gemäß Herstellerangaben auszuführenden Bohrlochabstände zu groß gewesen wären. Die Möglichkeit andauernder aufsteigender Feuchte und eine nachfolgende unzureichende Abtrocknung des Mauerwerks wäre die Folge gewesen. Inwiefern eine doppelreihige Bohrlochreihe die zwischen zwei Bohrlöchern noch aufsteigende Feuchte hätte „abfangen“ können, ist zu bezweifeln.

Bei wenig saugenden Baustoffen oder wie dem hier vorgestellten werkseitig wasserhemmend eingestellten Mörtel ist es ab einem ($D(g) > 50\%$) umso mehr wichtig, dass zum einen saugfähigere Materialien wie Ziegel/Kalksandstein vom IM erreicht werden (z.B. durch ein geneigtes Bohrloch, bei dem mehrere Ebenen Fuge/Ziegel erfasst werden) bzw. flankierende Maßnahmen wie eine konvektive Vortrocknung vorgenommen werden. Auch wenn die Ergebnisse bei Mörtel sehr gering ausfallen, so ist doch anzumerken, dass bei der Anwendung des vorgenannten Verfahrens am Bauwerk aus Mauerwerk sich die unzureichenden Ergebnisse aufgrund des Vorhandenseins eines stärker saugenden Materials wie Ziegel relativieren. Wichtig bleibt, dass dieser durch die Wahl des Bohrloches in der Lagerfuge auch für das IM zu erreichen ist.

Bei den durchgeführten Untersuchungen findet die maximale Ausbreitung des IM bei 0% statt, somit scheint keine Feuchte Voraussetzung für einen Transport des IM nötig zu sein.

Unter Berücksichtigung der vorgestellten Modellierung zur IM-Ausbreitung ist jedoch - im Abhängigkeit vom existierenden $D(g)$ - der Bohrlochabstand zur Ausführung der Abdichtungsmaßnahme anzupassen, d.h. mit zunehmender Durchfeuchtung des Mauerwerks sind immer kleinere Bohrlochabstände auszuführen.

Weder die abnehmende Ausbreitung noch der anzupassende Bohrlochabstand sind jedoch ausreichend in den entsprechenden Richtlinien bzw. den jeweiligen IM-Herstellerangaben berücksichtigt, so dass beim Anwender zwangsläufig die Meinung entsteht, bei einem Durchfeuchtungsgrad von 100% und einem Bohrlochabstand von 10-12 cm kann eine funktionsfähige Abdichtung erstellt werden. Dies erklärt auch die Fehlleistungen, die dazu führen, dass das Verfahren in der Fachwelt kritisch diskutiert wird. Eine Übertragbarkeit von Ergebnissen wie auch verallgemeinernde Angaben hinsichtlich der Ausführung, wie beispielsweise zum Bohrlochabstand, sind demzufolge äußerst kritisch zu bewerten.

Basis einer funktionsfähigen, nachträglichen, drucklosen IM-Horizontalabdichtung sind, wie die Studien zeigen, Voruntersuchungen hinsichtlich der Baustoffe selbst (Durchfeuchtungsgrad) so wie Kenntnisse der Materialbeschaffenheit des Mauerwerks (Wasseraufnahmevermögen), und letztendlich ist das zur Anwendung kommende IM darauf abzustimmen.

7 Evaluation der vorgenannten Thesen

7.1 These 1

Die Ausbreitung eines IM im Baustoff ist abhängig vom jeweils vorhandenen Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ und nimmt mit zunehmender Durchfeuchtung des Baustoffes ab.

Mittels verschiedener experimenteller Untersuchungen wie druckloser Applikation von Injektionsmitteln in verschiedenen Baustoffen [11], Durchführung des Tropfenaufsetztests, Messung der Ausbreitung eines IM im Baustoff wie auch Verfahren der Neutronenradiografie und -tomografie war es möglich zu belegen, dass die Ausbreitung eines IM in einem Baustoff eindeutig abhängig vom jeweiligen Durchfeuchtungsgrad des Baustoffes ist und sich damit indirekt proportional verhält.

Diese Abhängigkeit ist je nach gewähltem Baustoff und des IM in unterschiedlich starker Ausprägung vorhanden. [6, 7, 11]. Die Ausprägung der vorgenannten Abhängigkeit ist zudem linear, so dass diese auch grafisch mittels linearer Regression darstellen werden konnte [9]. Mittels der vorgenannten kernphysikalischen Verfahren war es zudem möglich, die experimentell gewonnenen Erkenntnisse zu bestätigen [46].

7.2 These 2

Anhand eines Modells zur IM-Ausbreitung lässt sich die vorgenannte Abhängigkeit grafisch darzustellen. Zudem lassen sich an dem Modell maximale Durchfeuchtungsgrade ermitteln, bis zu welchen ein Einsatz des IM erfolgsversprechend ist.

Die festgestellte Linearität der Ergebnisse der durchgeführten Studien [8, 10, 11] zur Injektionsmittelausbreitung wurden hierzu grafisch mittels linearer Regression dargestellt. Die teils hohen Werte der Korrelation spiegeln hierbei die ausgeprägte Abhängigkeit der beiden Parameter Durchfeuchtungsgrad und Ausbreitung eines IM zueinander wieder.

Anhand der ermittelten Werte war es möglich eine von der Autorin mitentwickelte Grundstruktur einer Modellierung [6] zur Injektionsmittel-Ausbreitung zu ergänzen, anzupassen und zu erweitern. Anhand der Ausführungen zur vorgenannten Modellierung ist es nunmehr möglich, Aussagen hinsichtlich des maximalen Durchfeuchtungsgrades zu treffen, bis zu welchem eine Applikation zielführend ist.

Zudem sind Aussagen hinsichtlich des vorzunehmenden Bohrlochabstandes möglich [6, 9, 11] welcher ebenso in Abhängigkeit zum Ausbreitungsradius eines IM steht. Dahingehend wurde anhand der Modellierung eine Grundlage geschaffen, anhand derer das Verfahren der nachträglichen Horizontalabdichtung für die Ausführung am Gebäude angepasst werden kann, um ein nachfolgendes Ergebnis einer vorzunehmenden Abdichtung zu optimieren.

7.3 These 3

Die Kombination Baustoff und IM bringt je nach verwendeten Materialien unterschiedliche Ergebnisse hervor, welche nicht allgemeingültig auf andere Baustoff/IM-Kombinationen übertragen werden können.

Anhand der vorgenannten experimentellen Techniken wie auch der Applikation von verschiedenen IM in unterschiedlichen Baustoffen wurde anhand verschieden durchgeführter Studien dargestellt, dass ein relevanter Faktor für die Ausbreitung in der gewählten Kombination Baustoff und IM liegt.

Es konnte anhand der Studien belegt werden, dass die Kombination IM und Baustoff je nach gewählter Kombination auch variierende Ergebnisse hervorbringt [6, 10, 11, 46, 53].

Dies ist auf die jeweiligen unterschiedlichen bauphysikalischen Eigenschaften wie beispielsweise Porosität und Kapillarität sowie ggf. das Wirkprinzip des IM zurückzuführen und beeinflusst demzufolge auch das Abdichtungsergebnis. Eine generelle Übertragbarkeit von Ergebnissen ist dahingehend kritisch zu bewerten.

In diesem Zusammenhang war es zudem möglich, den Einfluss der am Ort der Applikation vorherrschenden Temperatur ebenfalls als ausschlaggebend für die Ausbreitung eines IM zu bewerten [11].

7.4 These 4

Die Verteilung eines IM erfolgt nicht gleichmäßig, sondern es gibt Zonen unterschiedlich hoher IM-Gehalte, welche sich folglich auch auf die Wirksamkeit der Abdichtung auswirken. Folglich gibt es Unterschiede zwischen Ausbreitgrenze und Wirkgrenze eines IM.

Unter Verwendung der Neutronenradiografie wie auch der Neutronentomografie konnte bewiesen werden, dass die Konzentration der Ausbreitung eines IM im Baustoff nicht gleichmäßig erfolgt [11, 46].

Es wurde festgestellt, dass die Konzentration eines IM an den Randbereichen des behandelten Prüfkörpers durch den Durchfeuchtungsgrad des Prüfkörpers beeinflusst wird: in den Randbereichen sind höhere Konzentrationen des IM vorhanden als erwartet. Möglicherweise ist die auf einen niedrigeren Durchfeuchtungsgrad in den Randbereichen im Zuge einer bereits beginnenden Trocknung des Prüfkörpers zurückzuführen.

Dahingehend ist auch mit einer Beeinflussung der auszuführenden Abdichtung zu rechnen. Ob es sich hierbei um einen Effekt infolge einer leichten Abtrocknung des Prüfkörpers handelt oder um einen selektiven Transport von einzelnen Bestandteilen des IM, kann an dieser Stelle nicht eindeutig belegt werden.

Des Weiteren war es möglich, eine inhomogene Verteilung des IM im Baustoff selbst nachzuweisen. Es konnte anhand der durchgeführten Neutronentomografie Bereiche erhöhter IM-Konzentrationen im Baustoff nachgewiesen werden („IM-Inseln“), deren lokales Auftreten noch nicht im Detail geklärt ist. Als Ursache sind kleinere Inhomogenitäten im Baustoff denkbar.

8 Zusammenfassung und Bewertung sowie weiterer Forschungsansatz

Anhand der vorgestellten Untersuchungsergebnisse ist erkennbar, dass sich mehrere Faktoren limitierend auf die Ausbreitung eines IM im Baustoff auswirken können:

- der jeweilig vorhandene Durchfeuchtungsgrad des Baustoffes
- die Beschaffenheit des Baustoffes selbst (u.a. Porosität, Kapillarität, hydrophobe/hydrophile Eigenschaften)
- die Wahl des IM (Wirkprinzipien)
- die gewählte Kombination Baustoff und IM

Die Tendenz der abnehmenden Ausbreitung eines IM bei zunehmender Durchfeuchtung eines Baustoffes ist bei allen untersuchten Materialien (Mörtel, Klinker, Kalksandstein) gleich ausgeprägt, jedoch in unterschiedlicher Intensität, welche jedoch aber auch durchaus materialbedingt (Studie 1) als auch versuchsablaufbedingt (Studie 6) sein kann.

Die erhaltenen Untersuchungsergebnisse lassen aufgrund des erkennbaren Zusammenhangs zwischen Ausbreitung eines IM und des jeweiligen vorhandenen Durchfeuchtungsgrades eine Linearität erkennen, welche auch mittels linearer Regression grafisch dargestellt werden kann. Die erhaltenen, teils hohen Korrelationen spiegeln in diesem Sinne auch die Abhängigkeit der beiden Parameter wieder. Die beiden Parameter des Durchfeuchtungsgrades wie auch die Ausbreitung eines IM verhalten sich als Ergebnis indirekt proportional zueinander, unabhängig von der untersuchten Baustoff-/IM-Kombination.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse wurde eine von Verfasserin in Gemeinschaft entwickelte Modellierung zur Injektionsmittel-Ausbreitung weiterentwickelt und unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse angepasst. Dahingehend ist es nunmehr möglich, die vorgenannten Abhängigkeiten nicht nur grafisch, sondern auch mittels physikalischer Parameter darzustellen. Anhand dieser Modellierung ist es als Novum zudem möglich, Aussagen hinsichtlich des anzusetzenden Bohrlochabstandes zu treffen und somit einen entscheidenden Beitrag zur Funktionsfähigkeit des Verfahrens beizutragen.

Die auf experimenteller Basis vorgestellten Untersuchungen lassen sich zudem mittels kernphysikalischer Verfahren in eindrucksvoller Weise vertiefend und weiterführend darstellen. Anhand der durchgeführten Verfahren der Neutronenradiografie wie auch der Neutronentomografie sind Aussagen hinsichtlich der Verteilung eines IM im Inneren eines Baustoffes möglich. Die bereits experimentell festgestellte indirekte Proportionalität der beiden Parameter Durchfeuchtung des Baustoffes und Ausbreitung eines IM lässt sich somit auch mittels analytischer Verfahren nachweisen und bestätigen damit die getroffenen Aussagen. Als weitere Kernaussage sind mittels der Neutronentomografie Anreicherungszone von IM im Randbereich des Prüfkörper feststellbar, welche offenbar feuchteabhängig ausgebildet sind. Generell sind in der dreidimensionalen Darstellung des Prüfkörpers einzelne „IM-Inseln“ erkennbar, welche möglicherweise auf Inhomogenitäten im Baustoff zurückzuführen sind.

Die vorgenannten kernphysikalischen Verfahren schaffen zudem die Möglichkeit, unter Zuhilfenahme der entsprechenden Software eine dreidimensionale Verteilung eines IM im Baustoff bildgebend darzustellen und somit weitergehende Aussagen hinsichtlich möglicher Ausbreitungs- und Wirkungsgrenzen eines IM zu treffen. Da es sich bei beiden Verfahren um zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden handelt, können an demselben Prüfkörper zudem weitere Untersuchungen erfolgen, wodurch wiederum materialbedingte Schwankungen, welche zu treffende Aussagen erschweren könnten, ausgeschaltet werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass das Verfahren der nachträglichen Horizontalabdichtung mittels druckloser Injektion eine gute Möglichkeit bietet, eine funktionsfähige Abdichtung zu generieren.

Die vorliegende PhD-These zeigt in diesem Zusammenhang jedoch auf, dass es verschiedene Faktoren gibt, welche sich limitierend auf eine Ausbreitung eines IM und dahingehend auf den Erfolg einer durchgeführten Abdichtung auswirken können. Es bleibt folglich unumgänglich, bereits im Vorfeld zu einer geplanten Abdichtung diverse Voruntersuchungen vorzunehmen und das Verfahren daraufhin abzustimmen. Empfehlenswert sind diesbezüglich Probeinjektionen. Angaben seitens der Hersteller wie auch der Verarbeiter sind anhand der örtlichen Gegebenheiten zu überprüfen bzw. an die Abdichtungsmaßnahme anzupassen.

Dahingehend ist ein wertvoller Lösungsansatz für die zu Beginn der Thesis vorgestellte Problematik der vielfach festgestellten Fehlleistungen bei der gegenständlichen Abdichtungsmaßnahme erarbeitet worden, welcher auch in die Baupraxis übertragen werden kann.

Auf Basis der vorgestellten Untersuchungen sowie deren Ergebnisse sind detaillierte Fragen hinsichtlich des Ausbreit- wie auch des Wirkmaßes von Injektionsmitteln noch nicht vollumfänglich geklärt. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen nötig und auch vorgesehen, welche auch die geplante Quantifizierung der erhaltenen Untersuchungsergebnisse beinhalten.

Ein Einfließen der Untersuchungsergebnisse in eine zu erstellende Prüfvorschrift für nachträgliche Horizontalabdichtungen mittels druckloser Injektion ist seitens der Verfasserin in Planung.

9 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hinweise verwandt.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ottobrunn, _____

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Aufsteigende Feuchte an Gebäuden aus Mauerwerk.....	8
Abb. 2	Gebäudeschaden durch aufsteigende Feuchte.....	9
Abb. 3	Arten der Feuchtebeaufschlagung von Gebäuden	14
Abb. 4	Unterschiedliche Porenarten	16
Abb. 5	Sorptionsisothermen verschiedener Baustoffe	17
Abb. 6	Steighöhe von Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom Kapillardurchmesser.....	18
Abb. 7	Einbringen von Sperrbahnen anhand Aussparung.....	19
Abb. 8	Drucklose Applikation von IM an Mauerwerk.....	20
Abb. 9	Wirkprinzipien von Injektionsmitteln nach WTA-Merkblatt 04-10.....	21
Abb. 10	Verfärbung des Baustoffes durch Zugabe von Farbstoff zum IM	22
Abb. 11	Hydrophobie von Mörtelprüfkörpern nach erfolgter IM-Applikation	23
Abb. 12	w-Wert von Ziegelproben vor erfolgter Hydrophobierung.....	23
Abb. 13	w-Wert von Ziegelproben nach erfolgter Hydrophobierung	24
Abb. 14	Zersetzungstemperatur bei 370° C von hydrophobierend wirkenden IM	25
Abb. 15	Tautropfenbildung im Porenraum	25
Abb. 16	Darstellung von Metallteilen mittels Neutronenradiografie	26
Abb. 17	Unterschied Röntgen- und Neutronenstrahlung	27
Abb. 18	Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung Röntgen- oder Neutronenstrahlung.....	28
Abb. 19	Prinzip der neutroneninduzierten Kernspaltung	29
Abb. 20	Darstellung des Messvorganges.....	30
Abb. 21	Darstellung Untersuchungsmethoden Röntgen- und Neutronenstrahlung	32
Abb. 22	Anordnung Forschungsreaktor Budapest	33
Abb. 23	Digitales Aufnahmemodul der Versuchseinrichtung	34
Abb. 24	Drehbarer Probenhalter der Versuchseinrichtung.....	34
Abb. 25	Probenvorbereitung zum Spalten der Prüfkörper	35
Abb. 26	Durch Spalten abgetrenntes Probenstück	35
Abb. 27	Herstellung von Mörtelprüfkörpern.....	36
Abb. 28	Herstellung des Bohrloches nach Angaben des Herstellers.....	37
Abb. 29	Applikation von IM in Ziegelprüfkörpern	39
Abb. 30	IM-Applikation von Mörtelprüfkörpern	39
Abb. 31	Spaltung des Prüfkörpers	40
Abb. 32	Auftrennen von Prüfkörpern mittels apparativer Vorrichtung.....	41
Abb. 33	Visuell erkennbarer durch IM dunkel gefärbter Bereich des Baustoffes.....	41
Abb. 34	Verbleibende Wassertropfen nach Hydrophobierung.....	42
Abb. 35	Tropfenaufsetztest	42
Abb. 36	Darstellung zur Berechnung des Kontaktwinkels.....	43
Abb. 37	Ausbreitung IM bei D(g) 0%	45
Abb. 38	Ausbreitung IM bei D(g) 40%	46
Abb. 39	Studie 1, Lineare Regression Mörtel mit IM klassisch I.....	46
Abb. 40	Ausbreitung IM bei D(g) 0%, Hersteller 1.....	47
Abb. 41	Ausbreitung IM bei D(g) 60%, Hersteller 1.....	48
Abb. 42	Ausbreitung IM bei D(g) 60%, Hersteller 2.....	48
Abb. 43	Studie 2, Lineare Regression Mörtel mit IM klassisch II.....	49
Abb. 44	Ausbreitung IM bei D(g) 80%	50
Abb. 45	Studie 3, Lineare Regression Mörtel mit Creme I	51
Abb. 46	Abhängigkeit der Ausbreitung eines IM vom Durchfeuchtungsgrad	52

Abb. 47	Studie 4, Lineare Regression Mörtel mit Creme II	52
Abb. 48	IM-Ausbreitung bei D(g) 80%, Fabr. Wienerberger	53
Abb. 49	IM-Ausbreitung bei D(g) 40%, Fabr. Matzen Teggl	54
Abb. 50	Studie 5, Lineare Regression Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung	54
Abb. 51	Tropfenaufsetztest	55
Abb. 52	Ausbreitung IM KS-Stein bei D(g) 60%	56
Abb. 53	Ausbreitung IM Klinker bei D(g) 0%	56
Abb. 54	Studie 6, Lineare Regression Klinker/KS-Stein mit Verkieselung	57
Abb. 55	Ausbreitung IM KS-Stein.....	58
Abb. 56	Ausbreitung KS-Stein (farblich gekennzeichnet).....	58
Abb. 57	Ausbreitung IM Ziegel	59
Abb. 58	Ausbreitung IM Ziegel	59
Abb. 59	Studie 7, Lineare Regression Ziegel und KS-Stein mit Verkieselung	60
Abb. 60	Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt	61
Abb. 61	Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt.....	62
Abb. 62	Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch gerade	63
Abb. 63	Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch gerade	64
Abb. 64	Originalaufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt	65
Abb. 65	Farblich akzentuierte Aufnahme Prüfkörper Ziegel, Bohrloch geneigt.....	66
Abb. 66	Übersicht Neutronentomografie vier Prüfkörper, Seitenansicht.....	69
Abb. 67	Ansicht vier Prüfkörper, Neutronentomografie.....	69
Abb. 68	Schrägansicht der vier Prüfkörper.....	70
Abb. 69	Schrägansicht der vier Prüfkörper wie vor, Detail	71
Abb. 70	Querschnitt Grauwerteverteilung bei D(g) 50%	72
Abb. 71	Querschnitt Grauwerteverteilung bei D(g) 90%	73
Abb. 72	Oberflächennaher Horizontalschnitt Prüfkörper komplett	73
Abb. 73	Vertikalschnitt Prüfkörper frontal, Tiefe 2mm.....	74
Abb. 74	Schnitt Neutronentomografie Prüfkörper D(g) 90%.....	75
Abb. 75	Schnitt Neutronentomografie Prüfkörper D(g) 50%.....	75
Abb. 76	Lage des Prüfkörpers im Ziegel	76
Abb. 77	Fronansicht Prüfkörper	77
Abb. 78	Partielle Seitenansicht Prüfkörper	77
Abb. 79	Rückansicht Prüfkörper	77
Abb. 80	Lage obere Schnittebene.....	78
Abb. 81	Tomografie Querschnitt obere Schnittebene	78
Abb. 82	Lage untere Schnittebene	79
Abb. 83	Tomografie Querschnitt untere Schnittebene	79
Abb. 84	Prüfkörper nach erfolgtem Tropfenaufsetztest	83
Abb. 85	Uneingeschränkter Wassertransport in nicht hydrophobierten Bereich	83
Abb. 86	Lineare Regression IM A und IM B	84
Abb. 87	Modellierung der IM-Ausbreitung	85
Abb. 88	Ermittlung IM-Kennlinie	86
Abb. 89	Grafische Ermittlung der maximalen Ausbreitung eines IM	87
Abb. 90	Überlegung zum auszuführenden Bohrlochabstand.....	88
Abb. 91	Einsatzbereiche verwendeter IM gem. Bohrlochabstand WTA	88
Abb. 92	Grafische Ermittlung von A_{max} und k_{im}	89
Abb. 93	Ermittlung Einsatzbereich IM	90
Abb. 94	Grafische Ermittlungen zum Bohrlochabstand	91

Abb. 95 Anwendung der Modellierung auf den Einsatzbereich eines IM..... 93

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Klassifizierung der Wasseraufnahme von Baustoffen mittels Wasserausnahmekoeffizient..... 16

Tab. 2 Verwendete Injektionsmittel bei druckloser Applikation 21

Tab. 3 Einteilung Neutronen 29

Tab. 4 Kenndaten Studie 1 45

Tab. 5 Kenndaten Studie 2 47

Tab. 6 Kenndaten Studie 3 49

Tab. 7 Kenndaten Studie 4 51

Tab. 8 Kenndaten Studie 5 53

Tab. 9 Kenndaten Studie 6 55

Tab. 10 Kenndaten Studie 7 57

Tab. 11 Zusammenfassung Ergebnisse IM-Applikation 80

Tab. 12 Ermittelte Werte Ausbreitung IM A und IM B..... 84

Tab. 13 Zusammenstellung Formeln der Kennwerte zur Modellierung 92

Detaillierte Analytik

1 Studie 1 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch I

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
0	2,945		
10	3,104		
12	2,921		
Gemittelt:	2,990		
5		3,300	
6		3,455	
14		3,275	
Gemittelt:		3,343	
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	11,7

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g) in %	Ausbreitung (cm)
1	0	0,1*
2	52	4,2
3	70	6,7*
4	85	0,7
5	100	0,0
6	100	0,0
7	86	4,8*
8	70	2,4
9	54	0,4*
10	0	0,0
11	53	4,5
12	0	0,0
13	84	0,0
14	100	0,0
15	68	2,7

* aufgrund mangelnder Plausibilität in Auswertung nicht berücksichtigt

1 Studie 2 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch II, Hersteller A

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
1	3,356		
2	3,301		
3	3,381		
Gemittelt:	3,346		
13		3,784	
14		3,691	
15		3,668	
Gemittelt:		3,714	
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	10,99

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g) in %	Ausbreitung (cm)
1	0	0,8
2	0	0,9
3	0	1,1
4	40	0,2
5	40	0,2
6	40	0,2
7	60	0,1*
8	60	0,2
9	60	0,2
10	80	0,2
11	80	0,1
12	80	0,0
13	100	0,0
14	100	k.E.*
15	100	0,1

* kein Ergebnis

*** aufgrund mangelnder Plausibilität in Auswertung nicht berücksichtigt

1 Studie 2 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM klassisch II, Hersteller B

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
1	1,929		
2	2,139		
3	2,086		
Gemittelt:	2,051		
13		1,902	
14		2,149	
15		2,233	
Gemittelt:		2,094	
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	2,09

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
1	0	1,3
2	0	1,5
3	0	1,3
4	40	0,8
5	40	0,5
6	40	0,8
7	60	0,6
8	60	0,6
9	60	0,4
10	80	0,2
11	80	0,2
12	80	0,1
13	100	0,1
14	100	0,1
15	100	0,1

1 Studie 3 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme I

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
Abbindezeit 2 Tage:			
13	1,879	2,135	12,0
14	1,873	2,127	11,9
15	1,780	2,007	11,3
Kontrollstück K2	1,043	1,186	12,1
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	11,8
Abbindezeit 28 Tage:			
1	3,294	3,615	8,9
2	3,303	3,615	8,6
3	3,291	3,587	8,3
Kontrollstück K1	1,998	2,186	8,6
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	8,6

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):
2 Tage Abbindezeit

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
13	0	4,3
14	0	3,8
15	0	3,8
4	40	2,9
5	40	2,7
6	40	2,8
7	60	2,8
8	60	2,6
9	60	2,6
10	80	2,3
11	80	2,3
12	80	2,3
1	100	2,0
2	100	1,9
3	100	2,0

1 Studie 3 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme I

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):
28 Tage Abbindezeit

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
13	0	3,4
14	0	3,1
15	0	3,1
4	40	2,8
5	40	2,7
6	40	2,7
7	60	2,6
8	60	2,5
9	60	2,5
10	80	2,2
11	80	2,1
12	80	2,2
1	100	1,6
2	100	1,5
3	100	1,6

1 Studie 4 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme II

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
1	3,179	3,473	9,2
2	3,219	3,498	8,7
3	3,170	3,478	9,7
4	3,322	3,520	6,0
5	3,187	3,492	9,6
6	3,214	3,514	9,3
7	3,175	3,477	9,5
8	3,226	3,515	9,0
9	3,195	3,481	9,0
10	3,111	3,448	10,8
12	3,185	3,493	9,7
14	3,117	3,455	10,8
15	3,198	3,494	9,3
16	3,119	3,467	11,2
19	3,165	3,488	10,2
20	3,130	3,461	10,6
21	3,172	3,489	10,0
22	3,135	3,465	10,5
23	3,140	3,427	9,1
24	3,197	3,492	9,2
25	3,176	3,465	9,1
28	3,194	3,502	9,6
29	3,172	3,487	9,9
31	3,215	3,505	9,0
32	3,192	3,502	9,7
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	9,5

1 Studie 4 zur IM-Applikation, Kalk-Zement-Mörtel mit IM-Creme II

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch):

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
10	0	0,6
22	0	1,3
23	0	1,1
25	0	1,0
28	0	1,1
16	40	0,3
21	40	0,5
24	40	0,4
29	40	0,3
31	40	0,2
1	60	0,1
3	60	0,2
5	60	0,2
20	60	0,2
32	60	0,2
2	80	0,1
6	80	0,1
8	80	0,1
9	80	0,1
19	80	0,1
4	100	0,0
7	100	0,0
12	100	0,0
14	100	0,0
15	100	0,0

1 Studie 5 zur IM-Applikation, Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
Klinker hydrophob:			
5-1	4,218	4,418	4,7
5-2	4,217	4,410	4,6
5-3	4,202	4,402	4,8
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	4,7
Klinker hydrophil:			
10-1	3,350	4,017	19,9
10-2	3,406	4,052	19,0
10-3	3,365	4,021	19,5
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	19,5

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Wienerberger Klinker (hydrophob)

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
1-1	0	0
2-1	40	8,5
3-1	60	8,5
4-1	80	6,3
5-1	100	8,5
1-2	0	0,0
2-2	40	11,5
3-2	60	8,3
4-2	80	6,5
5-2	100	9,5
1-2	0	0,0
2-3	40	9,8
3-3	60	7,0
4-3	80	6,0
5-3	100	9,8

1 Studie 5 zur IM-Applikation, Klinker hydrophob/hydrophil mit Verkieselung

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Matzen Tegl (hydrophil)

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
6-1	0	0
7-1	40	11,5
8-1	60	11,5
9-1	80	11,0
10-1	100	11,0
6-2	0	0,0
7-2	40	10,5
8-2	60	8,8
9-2	80	8,8
10-2	100	8,5
6-3	0	0,0
7-3	40	9,0
8-3	60	7,5
9-3	80	8,5
10-3	100	8,5

1 Studie 6 zur IM-Applikation, Klinker/Kalksandstein

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper:

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
Klinker			
K-0-1	4,328		
K-0-2	4,325		
K-0-3	4,327		
Gemittelt:	4,327		
K-100-1		4,492	
K-100-2		4,488	
K-100-3		4,499	
Gemittelt:		4,493	
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	3,8
Kalksandstein			
KS-0-1	3,771		
KS-0-2	3,770		
KS-0-3	3,772		
Gemittelt:	3,771		
KS-100-1		4,109	
KS-100-2		4,112	
KS-100-3		4,109	
Gemittelt:		4,109	
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	8,2

1 Studie 6 zur IM-Applikation, Klinker/Kalksandstein

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Klinker

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
K-0-1	0	0,5
K-0-2	0	0,8
K-0-3	0	0,6
K-40-1	40	0,6
K-40-2	40	0,6
K-40-3	40	0,6
K-60-1	60	0,1
K-60-2	60	0,2
K-60-3	60	0,2
K-80-1	80	0,0
K-80-2	80	0,0
K-80-3	80	0,0
K-100-1	100	0,0
K-100-2	100	0,0
K-100-3	100	0,0

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Kalksandstein

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
KS-0-1	0	6,8
KS-0-2	0	7,2
KS-0-3	0	6,3
KS-40-1	40	4,0*
KS-40-2	40	9,5
KS-40-3	40	9,0
KS-60-1	60	6,4
KS-60-2	60	7,1
KS-60-3	60	9,9
KS-80-1	80	9,1*
KS-80-2	80	6,0
KS-80-3	80	4,5
KS-100-1	100	1,5
KS-100-2	100	1,0
KS-100-9	100	1,8

* aufgrund mangelnder Plausibilität in Auswertung nicht berücksichtigt

1 Studie 7 zur IM-Applikation, Ziegel/Kalksandstein mit IM-Creme

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper: Kalksandstein

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
1	3,668	4,078	11,2
2	3,665	4,067	11,0
3	3,654	4,126	12,9
4	3,704	4,110	11,0
5	3,621	4,065	12,3
6	3,667	4,078	11,2
7	3,718	4,124	10,9
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	11,5

Ermittelte Sättigungsfeuchte (in m-%) und Ausbreitmaße der Prüfkörper: Ziegel

Prüfkörper-Nr.	TM (kg)	FM (kg) nach Sättigung	Sättigungsfeuchte (m-%)
1	3,495	3,693	5,7
2	3,531	3,649	3,3
3	3,496	3,659	4,7
4	3,513	3,679	4,7
5	3,512	3,654	4,0
6	3,514	3,717	5,8
7	3,543	3,707	4,6
		Sättigungsfeuchte gemittelt (m-%)	4,7

1 Studie 7 zur IM-Applikation, Ziegel/Kalksandstein mit IM-Creme

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Kalksandstein

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
1	0	3,5
2	0	4,1
3	0	3,9
1	40	2,9
2	40	3,1
3	40	3,0
1	60	2,7
2	60	2,5
3	60	2,3
1	80	2,6
2	80	2,4
3	80	2,9
1	100	2,3
2	100	1,9
3	100	2,1

Ermittlung der Ausbreitung im cm (gemessen ab Kante Bohrloch): Ziegel

Prüfkörper-Nr.	Eingestellter D(g)	Ausbreitung (cm)
1	0	2,7
2	0	3,3
3	0	2,9
1	40	3,2
2	40	2,9
3	40	3,4
1	60	3,2
2	60	3,0
3	60	2,9
1	80	2,6
2	80	2,4
3	80	2,5
1	100	1,7
2	100	1,8
3	100	2,0

Literaturverzeichnis:

- [1] Weber, J., Hafkesbrink, V.: Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung. Springer Verlag, 4. Auflage 2016
- [2] Künzel, H.: Problembereich aufsteigende Feuchte. Zeitschrift Bausubstanz, Fraunhofer IRB Verlag, 03.2014, S. 34-40
- [3] Henes-Klaiber U.: Ursachen und Behandlungsmethoden von Feuchteschäden an historischen Bauwerken. ICOMOS Hefte 42, S. 129-138 (ohne Jahresangabe)
- [4] Balak, M.: Injektionsverfahren zur Horizontalabdichtung – aber richtig. 20. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2009, Beuth Verlage Berlin 2009, S. 43-53
- [5] Venzmer, H.: Das Saugen stoppen. B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 06.2014, S. 18-25
- [6] Walter, A., Venzmer, H.: Bohrlochabstände feuchteabhängig enger setzen. Nachträglich mit Injektionsmitteln horizontal abdichten. B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 06.2013, S. 28-32
- [7] Walter, A.: Experimental studies on the moisture dependent spread of injection agents. Pollack Periodica, Vol 14, No. 1/2, 2019 (noch unveröffentlicht)
- [8] Walter, A.: Experimental studies on the moisture-dependent spread of injection agents and conclusions, 13th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium, University of Pécs, Hungary, 3. – 04.11.2017
- [9] Walter, A., Venzmer, H.: Bautenschutz durch Abdichtung: Modellierung der Injektionsmittelausbreitung in Mauerwerksbaustoffen, in: Venzmer, H. (Hrsg.): Bautenschutz – Innovative Sanierungslösungen, Beuth Verlag 2013, S. 21-29
- [10] Walter, A., Venzmer, H.: B+B Dialog Abdichtung, 01.03.2013 Flyer, B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 2013
- [11] Walter, A. et al.: Injektionscremes – neue Studien zur Versagensgrenze von Injektionsmitteln bei höheren Durchfeuchtungsgraden, B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller 2018 (noch unveröffentlicht)
- [12] Falchi, L. et al.: Rising damp in historical buildings: A Venetian perspective. Building and Environment 131, 2018, S. 117-127
- [13] Austrian Standards Institute (Hrsg.): ÖNORM B3355 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk. Bauwerksdiagnose, Planungsgrundlagen, Ausführungen und Überwachung, 2017

- [14] ofi – Institut für Bauschadensforschung (Hrsg.): IFB Richtlinie, Nachträgliche Horizontalabdichtung von Stein- und Mischmauerwerk mittels hydrophobierender und/oder porrenverschließender Injektionsmittel. Ausgabe 09/2010, Wien
- [15] BuFAS-Ingenieur-Merkblatt IM_01/2009: Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen. Beuth Verlage Berlin 2009 (nicht mehr erhältlich)
- [16] WTA-Merkblatt 4-10: Injektionsverfahren mit zertifizierten Injektionsstoffen gegen kapillaren Feuchtetransport. Fraunhofer Verlag 2015
- [17] Venzmer, H. et al.: Abdichten mit zertifizierten Injektionsmitteln – neue Merkblätter und neue Entwicklungen. B+B Forum Abdichten im Holz- und Bautenschutz, 28./29.04.2011 Wismar, Beuth Verlag Berlin, S. 5-28
- [18] Dahlberg- Institut für Diagnostik und Instandsetzung historischer Bausubstanz Wismar (Hrsg.): Prüfvorschrift 02/2012 zur Zertifizierung von Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen am sanierten Bauwerk durch die Kenngröße Abdichtungsqualität AQ. Beuth Verlag 2012
- [19] Dahlberg- Institut für Diagnostik und Instandsetzung historischer Bausubstanz Wismar (Hrsg.): Prüfvorschrift 01/2010 zur Zertifizierung von hydrophobierenden, verfüllenden oder kombinierend wirkenden Injektionsmitteln für Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen. Beuth-Verlag 2010
- [20] Venzmer, H. et al.: Dicht oder undicht? Zur bauwerksdiagnostischen Beurteilung von Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen durch Sachverständige. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2010, Beuth Verlag S. 53-63
- [21] Balak, M., Pech, A.: Mauerwerkstrockenlegung. Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung. 3. Auflage, Birkhäuser Verlag 2017
- [22] Hölzen, F.-J.: Zur Bedeutung der thermisch-konvektiven Vortrocknung für Injektionsmittelabdichtungen bei hohem Durchfeuchtungsgraden. 20. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2009, Beuth Verlage Berlin 2009, S. 25-42
- [23] Balak, M.: Injektionsverfahren zur nachträglichen Horizontalabdichtung von Ziegelmauerwerk – aber richtig. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2010, Beuth Verlag S. 41-51
- [24] Weber, J.: Wirkmechanismen und Grenzen von Injektionsmitteln und deren Überprüfung. In: BuFAS e.V. (Hrsg.): Feuchte – Wärme-Schimmelpilz. 23. Hanseatische [Sanierungstage 01.-03.11.2012 in Heringsdorf, Beuth Verlag 2012, S. 37-60
- [25] Rahn, A. und Bonk, M: Analyse von Feuchte- und Salzschäden an historischen Gebäuden (komplexe Feuchtediagnostik). Bauphysik Kalender 2008, S. 469-486
- [26] Melichar, J. et al.: Practical testing of Injection Screens in Real-Life Structures. Procedia Engineering 195 (2017), S. 171-177

- [27] Lopez-Arce, P. et al.: Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings in Adelaide, South Australia. *Materials and Structures*, DOI 10.1617, 2008 (ohne Seitenangabe)
- [28] Holm, A. et al.: Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk.- *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 2. Jahrgang, Heft 5, 1996, S. 375-396
- [29] Hansen, T. et al: Moisture transport properties of brick – comparison of exposed, impregnated and rendered brick. *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering*, 22. -24. August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, S. 351-360
- [30] Hansen, T. et al.: Material characterization models and test methods for historic building materials. 11th *Nordic Symposium on Building Physics*, NSB20147, 11-14 June 2017, Trondheim. *Energy Procedia* 132 (2017), S. 315-320
- [31] Kruis, J. et al.: Salt transport in porous materials and its efficient computer implementation.- *Pollack Periodica* Vol 9, No. 2, 2014, S. 111-122
- [32] Hacquebord, A. et al.: Evaluation of Spreading and Effectiveness of Injection products against Rising Damp in Mortar/Brick Combinations. *Procedia Chemistry* 8 (2013), S. 139-149
- [33] Derluyn, H. et al.: Moisture transfer across the interface between brick and mortar join. *Conference proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics 2008*, Copenhagen, Denmark. *Conference Paper*, June 2008
- [34] Koronthalyova, O., Bagel, L.: Moisture transport in salt free and salt contaminated ceramic bricks. *Energy Procedia* 78 (2015), S. 1401-1406
- [35] Wojcik, R. et al.: Influence of chemical damp proof cream on the capillary action and microstructures of mortars. *Energy Procedia* 132 (2017), S. 670-675
- [36] IEMB Institut zur Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. (Hrsg.): *Feuchte im Bauwerk. Ein Leitfaden zur Schadenvermeidung*. Berlin 2007
- [37] Duzia, T., Bogusch, N.: *Basiswissen Bauphysik*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014
- [38] Lohmeyer, G. et al.: *Praktische Bauphysik Praxis*, 7. Auflage 2010, Springer Verlag
- [39] Moschig, G.: *Bausanierung. Grundlagen – Planung – Durchführung*. Vieweg + Teubner Verlag, 3. Auflage 2010
- [40] DIN EN ISO 18148: 2016-12: *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*. Beuth Verlag 2016

- [41] Thienel, K.-Ch.: Skript Werkstoffe I, Allgemeine Grundlagen, Stoffkennwerte, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Herbstsemester 2017, S. 23-42
- [42] Bakhrarov, O.: Untersuchungen des Porenvolumens von Bauwerkstoffen mittels lichtoptischer Methode. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2010, Beuth Verlag S. 153-165
- [43] Hölzen, F.-J.: Injektionsmittelanwendungen gegen aufsteigende Feuchtigkeit – Erfolgreiche Praxisbeispiele. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2010, Beuth Verlag 2010, S. 9-23
- [44] Lohmeyer, G. et al.: Praktische Bauphysik Studium, 7. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [45] Technische Universität München (N.N.): Kapillarität, Physikdepartment Vorlesung, Versuch Kapillarität (ohne Datumangabe)
- [46] Walter, A., Venzmer, H.: Untersuchungen zur Injektionsmittelverteilung in kapillarporösen Baustoffen mittels Neutronenradiografie. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Bautenschutz. Nachweismethoden und Anwendungen, Edition Bautenschutz 2018
- [47] Hölzen, F.-J.: Die Lizenz zum Abdichten. Qualitätssicherung bei der Bauwerksabdichtung. B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 01.2016, S. 50-53
- [48] Balak, M.: Planung und Ausführung mechanischer Horizontalsperren. 24. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2013, Beuth Verlage Berlin, S. 103-113
- [49] Boos, M.: Injektionsstoffe für nachträgliche chemische Horizontalsperren. 24. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2013, Beuth Verlage Berlin, S. 103-113
- [50] Venzmer, H. et al.: Zum Dauerthema: Aufsteigende Feuchtigkeit in Ziegelmauerwerken – Programmierte Fehlschläge, Lösungsansätze und Perspektiven für die Baupraxis. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Mauerwerksfeuchtigkeit, Schriftenreihe H12, Verlag Bauwesen Berlin 2001
- [51] Fic, S., Barnat-Hunek, D.: The effectiveness of hydrophobisation of porous building materials by using the polymers and nanopolymers solutions. International Journal of Material Science and Engineering Vol, 2 No. 2, December 2014, S. 93-98
- [52] TU Delft (Hrsg.): EMERISDA. Summary report on existing methods against rising damp.- D2.1 final version 31-07-2014
- [53] Walter, A., Venzmer, H.: Die Hitze bringt es an den Tag. Thermische Nachweismethode für Injektionsmittel in Mauerwerken. B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 04.2014, S. 28-32

- [54] Körber, P., Venzmer, H.: Zweistufiges Untersuchungsprogramm zum Nachweis der Wirksamkeit von Injektionsmitteln in Mauerwerksstrukturen. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Bautenschutz. Nachweismethoden und Anwendungen, Edition Bautenschutz 2018
- [55] Körber, P., Venzmer, H.: Rasterelektronenmikroskopische Nachweise von Injektionsmitteln in Mörtel- und Ziegelstrukturen unter Nutzung von Betaungsvorgängen. In: Venzmer, H. et al. (Hrsg.): Energielieferant Altbau, Potenziale – Nachhaltigkeit – Objektbeispiele. Beuth Verlag Berlin 2017, S. 91-103
- [56] Griesche, A. u.a.: Messung von Wasserstoffverteilungen in Eisen und Stahl mittels Neutronenradiographie und -tomographie. Präsentation DACH-Jahrestagung 2015 – Di.1.C.4
- [57] Kardjilov, N. et al.: Neutron imaging in material science. Materials Today Vol. 14, No. 6, 2011, S. 248-256
- [58] Schillinger, B.: Neutronen zeigen, was Röntgenstrahlen nicht können. NDT.net, 2008, S. 71-78
- [59] Neutron Imaging – wie Neutronen Bilder machen. Paul-Scherrer-Institut PSI Villingen/Schweiz, 2007
- [60] Manke, I. et al: Neutronen-Radiographie und -Tomographie in der Brennstoffzellenforschung. ZfP-Zeitung 109, April 2008.
- [61] European Neutron Scattering Association (ENSA): Neutrons for science and technology, Broschüre, 2. Auflage 2017
- [62] Komitee Forschung mit Neutronen: Neutronenquellen in Europa, www.sni-portal.de, abgerufen am Datum 30.04.2018
- [63] Sezentmiklósi, L., Kis, Z.: Neutron Radiography and Tomography. Skript Central European Training School on Neutron Techniques 2017, Budapest.
- [64] Kis, Z. et al.: Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre. 10th World Conference on Neutron Radiography, 5-10 October 2014, Physics Procedia 60 (2015), S. 40-47
- [65] Steffgen, T.: Neue Wege zum Nachweis der Tauwasserresistenz von weißen Putzoberflächen an Fassaden. Dissertation, Universität Pécs, 2018 (noch unveröffentlicht)
- [66] Kis, Z., Sezentmiklosi, L.: Neutron imaging, in: Füzi, J., Len, A. und Bajnok (Hrsg.): Research Instruments at the Budapest Neutron Centre: Handbook of the Central European Training School on Neutron Techniques, Budapest KFKI, 2017, S. 32-4
- [67] Venzmer, H.: Zur Saugfähigkeit von Mauerwerkmaterialien und deren Beeinflussung durch Injektionsmittel. 20. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2009, Beuth Verlage Berlin 2009, S. 13-18

- [68] Walter, A., Venzmer, H.: Nachweis von Injektionsmitteln in mineralischen Baustoffen mittels Thermischer Analyse (TA). In: Venzmer, H. et al. (Hrsg.): Energielieferant Altbau, Potenziale – Nachhaltigkeit – Objektbeispiele. Beuth Verlag Berlin 2017, S. 77-84
- [69] Taylor, M. et al.: Thermal neutron radiography using an high-flux compact neutron generator. Physics Procedia 88 (2017), S. 175-183
- [70] Kis, Z. et al: Water uptake experiments of historic construction materials from Venice by neutron imaging and PGAI methods. Materials and Structures (2017), No. 50, S. 159-159.
- [71] Krus, M., Künzel, H.M.: Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen. IBP Mitteilung 273/22, Fraunhofer Institut für Bauphysik 1995
- [72] Guimaraes, A. et al.: The interface effect in the Water Absorption in Ceramic Brick. Energy Procedia 78, 2015, S. 1395-1400
- [73] Weiss B., R. et al.: Fast Neutron Tomography of low-Z object und high-Z material shielding. 10th World Conference on Neutron Radiography, 5-10 October 2014, Physics Procedia 69 (2015), S. 275-283
- [74] Venzmer, H.: Informationen zum BUFAS-Ingenieur-Merkblatt IM-01/2009/Teile 01-06 „Injektionsmittel-Horizontalabdichtungen“. 20. Hanseatische Sanierungstage Heringsdorf 2009, Beuth Verlage Berlin 2009, S. 5-11
- [75] Burkinshaw, R.: The rising damp test of Camberwell Pier: Potential height of moisture rise in brickwork and the effectiveness of a modern chemical injection cream damp coursing application. Journal of Building Appraisal, Vol. 6, 2010, S. 5-19
- [76] Venzmer, H. (Hrsg.): Praxishandbuch Mauerwerkssanierung A-Z, Huss Verlag 2001
- [77] Balak, M.: Die etwas andere Feuchtigkeitscreme. Nachträglich Ziegelmauerwerk mit Injektionscremes horizontal abdichten. B+B Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 04.2014, S. 28-32
- [78] Zhang, P. et al.: Observation of Water Penetration into Water Repellent and Cracked Cement-based Materials by means of Neutron Radiography. Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 15, No. 2, S. 91-100
- [79] Lehmann, E. et al.: Recent applications of neutron imaging methods. Physics Procedia 88, 2017, S. 5-12
- [80] Kupsch, A. et al: Compton-CT als Alternative zur Neutronentomographie?. DACH-Jahrestagung 2015 – Mo.3.A.2, ohne Seitenangabe
- [81] Budapest Neutron Centre BNC: RAD – Static/dynamic thermal-neutron and X-ray imaging station, www.bnc.hu, abgerufen am 23.09.2018