

University of Pécs
Faculty of Engineering and
Information Technology
Breuer Marcell
Doctoral School



PHD- THESIS



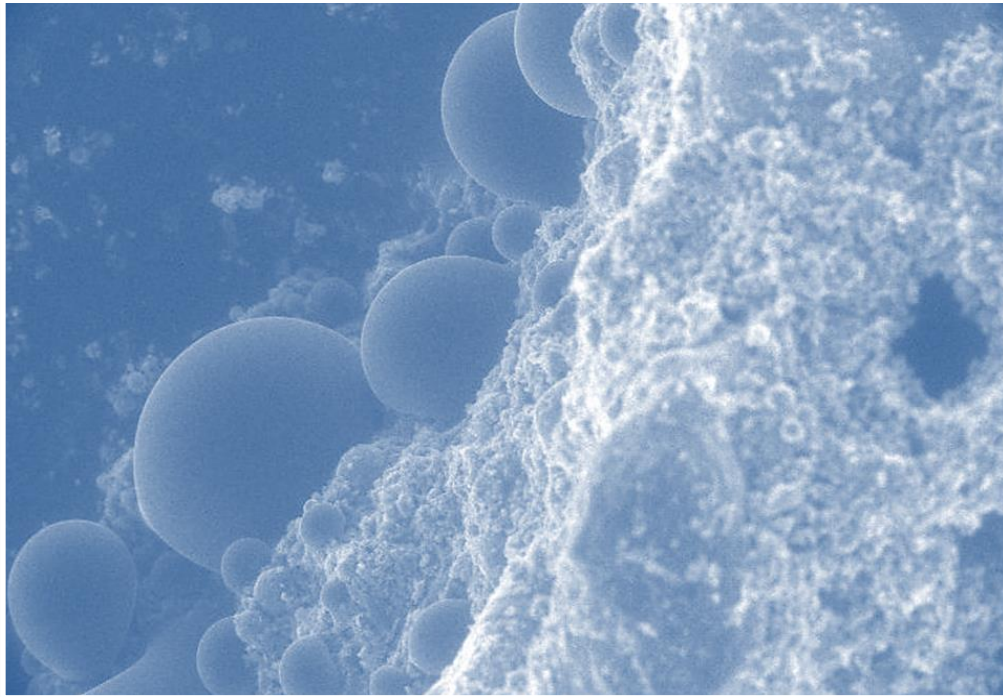
Neu entwickeltes Nachweisverfahren für die Wirksamkeit von abdichtenden, nachträglichen Injektionsmitteln, die im Altbau- und Denkmalsbereich eingesetzt werden.

Nachweis der Wirksamkeit wasserabweisender Injektionsverfahren für eine nachträgliche Mauerwerksabdichtung, basierend auf experimentellen Untersuchungen an Ziegeln und Mörtel, mit dem Rasterelektronenmikroskop im ESEM-Mode, sowie in der Korrelation zu konventionellen Nachweisverfahren

University of Pécs

Breuer Marcell Doctoral school

Faculty of engineering and information technology



in cooperation with
Hochschule Wismar
University of Applied Science, Technology, Business and Design
Faculty of engineering

PHD- Thesis

of Peter Körber M.Sc.
to obtain the degree

Philosophiae Doctor Ph.D.

at the
Breuer Marcell Doctoral school
University of Pécs

Zusammenfassung

Nachweis der Wirksamkeit wasserabweisender Injektionsverfahren für eine nachträgliche Mauerwerksabdichtung, basierend auf experimentellen Untersuchungen an Ziegeln und Mörtel, mit dem Rasterelektronenmikroskop im ESEM- Mode, sowie in der Korrelation zu konventionellen Nachweisverfahren

Auf Grund der Problematik von aufsteigender Mauerwerks-Feuchte an kapillaren Mauerwerken bei fehlender Querschnittsabdichtung (Q-Sperre), werden Injektionsmittel, die hydrophobierend und/oder porenverengend wirken, nachträglich im Bohrlochverfahren eingesetzt. Eine solche nachträgliche Q-Sperre muss in ihrer Wirksamkeit überprüft werden. Hierzu wird neben bereits existierenden makroskopischen Verfahren ein neues mikroskopisches Nachweisverfahren vorgestellt. Dieses Nachweisverfahren nutzt das Environmental Scanning Microscope (ESEM), bei dem in situ Betauungsvorgänge an den aus der Injektionsebene entnommenen Proben erzeugt und nachgewiesen werden können. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt per Bild oder Film. Anhand der Betauung im ESEM mit dem Medium Wasser können über das Kontaktwinkelmessverfahren an den Tautropfen zutreffende Aussagen über die wasserabweisenden Fähigkeiten der Untersuchten Probe und somit über die Wirksamkeit der Abdichtung, getätigt werden. Es bestehen nachweisbare Korrelationen zu den makroskopischen Nachweisverfahren. Im vorliegend vorgestellten neuen Nachweisverfahren wird in zwei Stufen vorgegangen, indem in Stufe 1 makroskopische Messdaten, bezogen auf das eingesetzte Injektionsmittel erfasst werden. In der zweiten Stufe werden im ESEM, anhand von Betauungsvorgängen, mikroskopische Kontaktwinkel gemessen und mit den in Stufe 1 gewonnenen Daten über ein rechnerisches Modell korreliert. Im Ergebnis kann ein geometrisches, qualitatives und quantitatives Bild von der durch den Injektionsmitteleinsatz veränderten Kapillarität dargestellt werden. Das hier vorgestellte Verfahren versteht sich als Weiterentwicklung bereits bestehender Verfahren und bietet den Vorteil, dass mit geringen Probenmengen in kurzer Zeit sehr präzise Ergebnisse erzielt werden können. Das neue Nachweisverfahren eignet sich für den baupraktischen Einsatz.

Abstract

Proof of the effectiveness of water-repellent injection methods for a subsequent masonry seal, based on experimental investigations on bricks and mortar, with the scanning electron microscope in ESEM mode, as well as in the correlation to conventional detection methods

Due to the problem of rising masonry moisture on capillary masonry in the absence of a cross-section sealing, injection agents that have a hydrophobic and pore-filling effect, subsequently are used in the borehole method. Such a subsequent masonry sealing must be checked for effectiveness. In addition to already existing macroscopic methods, a new microscopic detection method is presented in this work. This detection method uses ESEM technology in the SEM to generate and detect in situ dew processes at samples taken from the injection level of the examined masonry. The output of the results is done by image or film. By means of the condensation with the medium of water, the contact angle measurement method on the dew drops can be used to make accurate statements about the water-repellent capabilities of the examined sample and thus about the sealing success. There are detectable correlations to the macroscopic detection methods. In the presently presented new detection method, the procedure is carried out in two stages by capturing macroscopic data, related to the injection medium used in stage 1. In the second stage, microscopic contact angles are measured in the ESEM by means of condensation processes and correlated with the data obtained in stage 1 using a mathematical model. As a result, a geometric, qualitative and quantitative picture of the capillarity changed by the use of the injection agents can be presented.

The method presented in this work is a further development of already existing methods and offers the advantage to have very small samples and to be investigated in a short time with very precise results. The new detection method is suitable for practical use.

Abkürzungen- und Formeln

| | | |
|---------------|---|-----|
| $M\%$ | <p>Kapillare Wasseraufnahme</p> $M - \% = \frac{m_s - m_{tr}}{m_{tr}} \times 100$ <p>m_s = Masse der feuchten Probe m_{tr} = Masse der trockenen Probe</p> | (1) |
| $D_{(g) kap}$ | <p>Kapillarer Durchfeuchtungsgrad</p> $D_{(g) kap} [\%] = \frac{\text{Feuchtegehalt [M. -\%]}}{\text{maximale kapillare Wasseraufnahme [M. -\%]}} \times 100$ | (2) |
| $D_{(g) ges}$ | <p>Maximale Wasseraufnahme (Sättigungsfeuchte)</p> $D_{(g) ges} [\%] = \frac{\text{Feuchtegehalt [M. -\%]}}{\text{maximale Wasseraufnahme [M. -\%]}} \times 100$ <p>$D_{(g) ges} > D_{(g) kap}$</p> | (3) |
| M_{hyg} | <p>Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme</p> $\text{Wasseraufnahme hygroskopisch M. -\%} = \frac{m_{gf} - m_{tr}}{m_{tr}} \times 100$ <p>m_{gf} = Masse der feuchten Probe nach Wasseraufnahme aus der Luft m_{tr} = Masse der trockenen Probe</p> | (4) |
| $D_{(g) hyg}$ | <p>Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad</p> $D_{(g) hyg} [\%] = \frac{\text{hygroskopischer Feuchtegehalt [M. -\%]}}{\text{maximale kapillare Wasseraufnahme [M. -\%]}} \times 100$ | (5) |

| | | |
|---|---|------------|
| <p><i>h</i></p> | <p>Kapillare Steighöhe aufsteigender Feuchte</p> $h [cm] = \frac{2 \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$ <p><i>h [cm]</i> = Steighöhe <i>σ [g cm⁻¹]</i> = Oberflächenspannung aufsteigende Flüssigkeit <i>θ [°]</i> = Randreibungswinkel: Flüssigkeitsspiegel – Kapillarwand <i>r [cm]</i> = Radius der Kapillare <i>ρ [g cm⁻³]</i> = spezifisches Gewicht der Flüssigkeit <i>g [10 m/s²]</i> = Erdbeschleunigung</p> | <p>(6)</p> |
| <p><i>AQ</i></p> | <p>Abdichtungsqualität</p> $AQ = \frac{R_{e,w}}{R_{m,w}} \cdot 100\% = \frac{W_r - W_i}{W_r - 0,5} \cdot 100\%$ <p><i>R_{e,w}</i> = Reduzierkoeffizient erreicht <i>R_{m,w}</i> = Reduzierkoeffizient maximal <i>AQ [%]</i> = Abdichtungsqualität <i>W_i [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{t}$]</i> = W-Wert Injektionsebene <i>W_r [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{t}$]</i> = W-Wert Referenzebene</p> | <p>(7)</p> |
| <p><i>R_{e,w}</i> <i>R_{m,w}</i></p> | <p>Reduzierkoeffizienten Abdichtungsqualität</p> $R_{e,w} = \frac{W_r - W_i}{W_i} \quad R_{m,w} = \frac{W_r - 0,5}{W_r}$ <p><i>R_{e,w}</i> = Reduzierkoeffizient erreicht <i>R_{m,w}</i> = Reduzierkoeffizient maximal <i>W_i [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{t}$]</i> = W-Wert Injektionsebene <i>W_r [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{t}$]</i> = W-Wert Referenzebene</p> | <p>(8)</p> |
| <p><i>B</i></p> | <p>Wassereindring- Koeffizient</p> $B = \frac{h}{\sqrt{t}}$ <p><i>B</i> = Wassereindring- Koeffizient <i>h</i> = Steighöhe <i>√t</i> = Zeit</p> | <p>(9)</p> |

| | | |
|--------------------------------------|---|-------------|
| w | <p>Wassereindring- Wert</p> $w = \frac{\Delta M}{A \cdot \sqrt{t}}$ <p>w = Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m² *h^{0,5} ΔM = aufgenommene Wassermasse bis zum Zeitpunkt t in g/m² t = Saugzeit in Stunden (h) A = Saugfläche</p> | (10) |
| γ_{SG} | <p>Youngsche Gleichung: Grenzflächenspannung zwischen fest und gasförmig</p> $\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta$ <p>γ_{SG} = Grenzflächenspannung zwischen fest und gasförmig γ_{SL} = Grenzflächenspannung zwischen fest und flüssig γ_{LG} = Grenzflächenspannung zwischen flüssig und gasförmig</p> | (11) |
| cosθ | <p>Youngsche Gleichung zur Berechnung des Kontaktwinkels</p> $\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$ | (12) |
| H | <p>Kontaktwinkelhysterese</p> $H = \theta_a - \theta_r$ <p>θ_a = Fortschreitkontaktwinkel θ_r = Rückzugskontaktwinkel</p> | (13) |
| $\frac{\theta}{2}$ | <p>Kontaktwinkelmessung nach der $\theta / 2$-Methode</p> $\frac{\theta}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d} \right)$ <p>θ = Kontaktwinkel h = Höhe Tropfen d = Tropfenradius</p> | (14) |
| y | <p>verwendete Lineare Funktionen</p> $y = m * x + n$ <p>Steigung [m] = $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$</p> $n = y * \text{Kehrwert} (m * x)$ | (15) |

| | | |
|------------------------|---|------|
| <i>D_(g)</i> | Durchfeuchtungsgrad | (16) |
| <i>U_(m)</i> | Feuchtegehalt, massebezogen | (17) |
| <i>U_(v)</i> | Feuchtegehalt, volumenbezogen | (18) |
| <i>U_(s)</i> | Sättigungsfeuchte | (19) |
| <i>DF</i> | Dünnsformat, Ziegelsteine, d=52 mm (240 x 115 x 52 mm) | (20) |
| <i>NF</i> | Normalformat, Ziegelsteine, d=71 mm (240 x 115 x 71) | (21) |
| <i>2DF</i> | 2- faches Dünnsformat, Ziegelsteine, d=113 mm (240 x 115 x 113) | (22) |
| <i>IM</i> | Injektionsmittel | (23) |
| <i>RD</i> | Rohdichte | (24) |
| <i>W₂₄</i> | Wassereindringwert, gemessen innerhalb von 24 Stunden | (25) |
| <i>REM</i> | Raster- Elektronen- Mikroskop | (26) |
| <i>ESEM</i> | Environmental Scanning Electron Microscope | (27) |
| <i>RH</i> | Relative Humidity = Relative Luftfeuchte | (28) |

1. INHALT

| | | |
|---------|---|----|
| 2. | EINFÜHRUNG UND AUFGABENSTELLUNG | 3 |
| 2.1 | EINFÜHRUNG IN DAS THEMA..... | 3 |
| 2.2 | FEUCHTEVERHALTEN VON KAPILLAREN BAUSTOFFEN | 3 |
| 2.2.1 | Grundlegendes zur Bauwerksfeuchte..... | 3 |
| 2.2.2 | Porenstrukturen von kapillaraktiven Baustoffen | 5 |
| 2.2.2.1 | Stoffliche Bestandteile von Ziegeln und Mörtel | 10 |
| 2.2.3 | Feuchtebelastungen von Bauteilen / Baustoffen | 11 |
| 2.2.3.1 | Durchfeuchtungsprofile von Mauerwerken | 11 |
| 2.2.3.2 | Aufsteigende Feuchte in kapillaren Mauerwerken..... | 12 |
| 2.2.3.3 | Bauschädliche Salze auf Grund hoher Feuchtebelastung | 14 |
| 2.2.3.4 | Abdichtungsebenen bei Gebäuden | 15 |
| 2.2.3.5 | Lastfallbestimmung der Bauwerksabdichtung | 16 |
| 2.3 | NACHTRÄGLICHE BAUWERKSABDICHTUNG MITTELS INJEKTIONSMITTELN | 17 |
| 2.3.1 | Grundsätzliches zu nachträglichen Bauwerksabdichtungen | 17 |
| 2.3.2 | Nachträgliche Querschnittsabdichtungen | 18 |
| 2.3.3 | Einbau einer nachträglichen Querschnittsabdichtung unter Anwendung von Injektionsmitteln..... | 18 |
| 2.3.4 | Wirkweise von Injektionsmitteln zur Bauwerksabdichtung | 19 |
| 2.3.5 | Anwendungsmöglichkeiten von Injektionsmittel- Bauwerksabdichtungen | 20 |
| 2.3.5.1 | Beschreibung des Bohrlochinjektionsverfahrens zur nachträglichen Mauerwerks-Querschnittsabdichtung | 22 |
| 2.3.5.2 | Wirksamkeit der Abdichtung | 23 |
| 2.3.5.3 | Grundlegende Fragestellung: Inwieweit verhindert die nachträgliche Abdichtungsebene die kapillare Weiterleitung nach der erfolgten Injektion..... | 25 |
| 2.3.5.4 | Forderungen an ein neues Nachweisverfahren zur Wirksamkeit von Injektionsmittelabdichtungen..... | 28 |
| 3. | STAND DER TECHNIK – STAND DER WISSENSCHAFT | 28 |
| 3.1 | STAND DER TECHNIK | 28 |
| 3.1.1 | Anforderungen an die nachträgliche Abdichtung von Bauwerken durch Injektionsmittel mittels Bohrlochketten..... | 29 |
| 3.1.2 | Nachweis des Abdichtungserfolges bei nachträglichen Querschnittsabdichtungen mittels Injektionsmitteln | 29 |
| 3.1.3 | Technische Anforderungen an die Injektionsmittelanwendung | 30 |
| 3.1.3.1 | Bauwerksdiagnose und Lastfall der Bauwerksabdichtung | 30 |
| 3.1.3.2 | Planung der nachträglichen Bauwerksabdichtung | 31 |
| 3.1.3.3 | Anforderungen an die Bohrlochinjektion..... | 31 |
| 3.2 | STAND DER WISSENSCHAFT: INTERNATIONALE VERÖFFENTLICHUNGEN | 33 |
| 3.2.1 | Environmental SEM and related Applications, History of the ESEM and basic design concepts | 33 |
| 3.2.2 | Topographic contrast of partially wetting water droplets in environmental scanning electron microscopy..... | 33 |
| 3.2.3 | Environmental Scanning Electron Microscopy | 34 |
| 3.2.4 | Dynamic secondary electron contrast effects in liquid systems studied by ESEM | 34 |
| 3.2.5 | Electron beam heating effects during environmental scanning electron microscopy..... | 35 |
| 3.2.6 | Application of the environmental scanning electron microscope to conservation science..... | 35 |
| 3.2.7 | ESEM development and application in cultural heritage conservation..... | 35 |
| 3.2.8 | Modeling / Optimization of superhydrophobic condensation | 36 |
| 3.2.9 | Contact angle and wetting properties | 36 |
| 3.2.10 | Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations | 36 |
| 3.2.11 | Removing capillary moisture from brick walls using a drying method and case study | 37 |
| 3.2.12 | Methods for elimination of dampness in building walls | 37 |
| 3.2.13 | Impact of the chemical injection method on the dispersion of the injected agents in masonry | 38 |
| 3.2.14 | Relevanz der intern. Veröffentlichungen für die hiesige Arbeit | 38 |
| 3.2.15 | C.Hecht / T.Steiner: Der Bausachverständige, 2. / 2009 | 39 |
| 3.2.16 | K.Unterwede/ F.Schmidt-Döhl: Bausachverständige 2009 | 41 |
| 3.2.17 | H.Weber: ARCONIS 1 / 2002 | 42 |
| 3.2.18 | H.Weber: Der Bausachverständige 6 / 2005 | 42 |
| 3.2.19 | D.Honsinger, Der Bausachverständige, 1 / 2013 | 43 |
| 3.2.20 | Remmers- Akademie Reihe Gebäudeinstandsetzung | 45 |
| 3.2.21 | F.Frössel, Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung | 46 |
| 3.2.22 | H.Venzmer (Hrsg): Europäischer Sanierungskalender | 48 |
| 4. | MESSMETHODEN DER WASSERAUFNAHME..... | 50 |
| 4.1 | SAUGVERMÖGEN KAPILLARER BAUSTOFFE | 50 |
| 4.2 | BESTIMMUNG DES WASSEREINDRING- WERTES (W-WERT) | 50 |
| 4.3 | MESSUNG DES KONTAKTWINKELS | 51 |
| 4.3.1 | Messung des Kontaktwinkels an Baustoffen | 53 |
| 4.3.2 | Kontaktwinkel- Messverfahren / -Bestimmungen | 54 |
| 4.3.2.1 | Statische Kontaktwinkel | 54 |
| 4.3.2.2 | Dynamische Kontaktwinkel | 54 |
| 4.3.2.3 | Tropfenkonturanalysen | 56 |
| 4.3.3 | Definition: Hydrophob - Hydrophil | 57 |
| 5. | THESEN ZUM INJEKTIONSMITTEL – NACHWEIS | 58 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.1 | 4 THESEN ZUM NACHWEIS VON INJEKTIONSMITTELN IM MAUERWERK | 58 |
| 5.1.1 | <u>These 1</u> | 58 |
| 5.1.2 | <u>These 2</u> | 58 |
| 5.1.3 | <u>These 3</u> | 59 |
| 5.1.4 | <u>These 4</u> | 59 |
| 6. | 2- STUFIGE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG ZIEGEL / MÖRTEL | 60 |
| 6.1 | VERSUCHSANORDNUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG | 60 |
| 6.2 | <u>VERSUCHSANORDNUNG STUFE 1</u> | 60 |
| 6.2.1 | Proben- Pool mit 122 Proben | 60 |
| 6.2.1.1 | Injektions- Versuch mit Ziegeln, Mörtel und Mauerwerken | 61 |
| 6.2.1.2 | Chemismus und Technische Daten der Injektionsmittel | 61 |
| 6.2.1.3 | Fotos zum Versuchsaufbau Stufe 1 | 62 |
| 6.2.1.4 | Beschreibung Versuch Stufe 1 | 63 |
| 6.3 | <u>VERSUCHSANORDNUNG STUFE 1A</u> | 64 |
| 6.3.1.1 | Messung der Relativen Feuchte in definierten Messkammern im Probeninneren mittels Datenlogger | 64 |
| 6.3.1.2 | Fotos zum Versuchsaufbau Stufe 1a | 65 |
| 6.3.1.3 | Beschreibung Versuch Stufe 1a | 65 |
| 7. | ERGEBNISSE VERSUCH STUFE 1 | 67 |
| 7.1 | ERGEBNISSE AN MIT INJEKTIONSMITTELN BEHANDELTEN PROBEN | 67 |
| 7.1.1 | Auswertung der makroskopischen Messergebnisse | 68 |
| 8. | VERSUCHE DER STUFEN 1A UND 2 | 72 |
| 8.1 | ERGEBNISSE DER ESEM- UNTERSUCHUNG, STUFE 2 | 72 |
| 8.1.1 | Prüfergebnisse des Datenlogger- Messverfahrens, Stufe 1a | 72 |
| 8.1.2 | Stufe 2: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel, korrelierte w-Werte, RH- Werte | 74 |
| 8.1.3 | Beziehung ESEM- Kontaktwinkel: RH / W-Wert / Wassergehalt | 74 |
| 9. | ERGEBNISSE DER REM & ESEM UNTERSUCHUNGEN, STUFE 2 | 76 |
| 9.1 | DAS RASTERELEKTRONEN MIKROSKOP IM ESEM- MODE | 76 |
| 9.1.1 | Phasendiagramm von Wasser in Bezug auf Temperatur / Druck | 77 |
| 9.1.2 | Funktionsweise des ESEM in Schaubildern | 77 |
| 9.1.3 | Der ESEM- Mode des REM | 78 |
| 9.2 | REM: UNTERSUCHUNG DES HYDROPHOBIERUNGS- FILMS | 78 |
| 9.3 | ESEM: BETAUUNGEN AN ZIEGEL- UND MÖRTEL- PROBEN | 83 |
| 9.3.1 | ESEM- Betauung: Hydrophil => Wasserfilm- Bildung | 83 |
| 9.3.2 | ESEM- Betauung: Hydrophil => Tropfenbildung < 90° | 84 |
| 9.3.3 | ESEM- Betauung: Hydrophob => Tropfenbildung > 90° | 85 |
| 9.3.4 | ESEM- Betauung: Superhydrophob => Tropfenbildung > 150° | 87 |
| 9.3.5 | ESEM- Betauung: Hydrophil => Wasserfilmbildung | 88 |
| 9.3.6 | ESEM- Betauung: Hydrophob => Tropfenbildung > 90° | 90 |
| 9.3.7 | ESEM- Betauung: Kontaktwinkel Messung mit der geometrischen Tropfen- Kontur- Analyse | 92 |
| 10. | RECHNERISCHE MODELLIERUNG | 93 |
| 10.1 | BEZIEHUNG KONTAKTWINKEL => W-WERT / FAKTOR A* \sqrt{t} | 93 |
| 11. | REFLEKTION ZU DEN 4 EINGANGS- THESEN | 96 |
| 11.1.1 | <u>These 1</u> | 96 |
| 11.1.2 | <u>These 2</u> | 97 |
| 11.1.3 | <u>These 3</u> | 98 |
| 11.1.4 | <u>These 4</u> | 98 |
| 12. | ZUSAMMENFASSUNG, FAZIT, AUSBLICK | 99 |
| 12.1 | ZUSAMMENFASSUNG | 99 |
| 12.2 | FAZIT | 101 |
| 12.3 | AUSBLICK | 102 |
| 1. | NACHSPANN | 1 |
| I. | VERÖFFENTLICHUNGEN VON P. KÖRBER IM RAHMEN DIESER THESIS | 1 |
| II. | REFERENZEN | 1 |
| III. | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 6 |
| IV. | VERZEICHNIS DER FORMELN | 9 |
| V. | TABELLENVERZEICHNIS | 10 |
| VI. | DIAGRAMMVERZEICHNIS | 10 |
| VII. | KONSULTATIONEN / VIII.EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNGEN / IX.DANKSAGUNG | 11 |
| X. | LEBENS LAUF | 11 |
| 2. | ANLAGENVERZEICHNIS | 13 |

2. EINFÜHRUNG UND AUFGABENSTELLUNG

2.1 Einführung in das Thema

Dem Thema Bautenschutz im Allgemeinen und in Bezug auf bestehende Altbauten [1] im Besonderen, kommt im Hinblick auf eine nachhaltige Erhaltung der Bausubstanz [2] eine wachsende Bedeutung zu. Dabei lässt gerade die Mannigfaltigkeit der Problemstellungen erkennen, dass die Entwicklung diesbezüglich teilweise noch in den ‚Anfängen‘ steckt. Viele Themen und Detailfragen sind in der Tiefe ungeklärt und bedürfen weiterer Forschung und Entwicklung [3].

Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind stark schwankende/ansteigende Grundwasserspiegel, beziehungsweise zunehmende Fälle von aufstauendem Sickerwasser nur einige von vielen Gründen dafür, dass über die Feuchtebelastung von Gebäuden und Bauteilen, wie insbesondere Wänden diskutiert werden muss. Dabei sind die Ursachen, wie auch die Auswirkungen auf die Bausubstanz situativ und einzelfallbezogen zu betrachten [1], [4], [5], [6], [7], [8] .

Bezüglich der tatsächlichen Feuchtegehalte von beispielsweise Kellerräumen sind zudem in den letzten Jahrzehnten gestiegene Anforderungen zu verzeichnen. Die Frage nach der Bauwerksabdichtung von Hochbauten und deren abdichtungstechnischem Zustand rückt auf diese Weise in den Fokus. Der nachträglichen Abdichtung von Bauwerken kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Geht es doch überdies in vielen Fällen um die Erhaltung alter, historischer Bausubstanz, deren Einzigartigkeit einen hohen kulturellen Wert darstellt. Hier wird auf Grund der Vielfalt der vorhandenen Einwirkungen auf die Bausubstanz und auf Grund der Vielfalt der verwendeten historischen und gegenwärtigen Materialien die Komplexität der nachträglichen Abdichtungsaufgabe deutlich [9], [10], [11], [12].

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem spezifischen labormäßigen Nachweis von eingesetzten Injektionsmitteln zur nachträglich Bauwerksabdichtung von kapillaren Baustoffen, hier insbesondere Mauerwerke. Im Rahmen der hiesigen Versuche werden Untersuchungen der Kapillarität von Mauerwerksmörteln und Vollziegeln bei Einsatz von hydrophobierenden / porenverengenden Injektionsmitteln zur nachträglich Mauerwerksabdichtung im drucklosen und im Druckverfahren durchgeführt.

Beide Baustoffgruppen, Mörtel und Ziegel sind zum einen mit divergierenden Kapillar- Raumsystemen ausgestattet [13]. Dieses drückt sich im unterschiedlichen Wasseraufnahmeverhalten, wie in Abbildung 2b zu sehen ist, aus. Zum anderen spielt der tatsächliche Feuchtegehalt des Materials eine Rolle, da Wasser in bestimmten Porenräumen angelagert wird. Diese Faktoren wirken sich auf die Kapillarität des Baustoffs deutlich aus. Aus diesem Grund wurden in dem hiesigen Laborversuch unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade zum Zeitpunkt der Injektionsmittel-Applikation hergestellt.

2.2 Feuchteverhalten von kapillaren Baustoffen

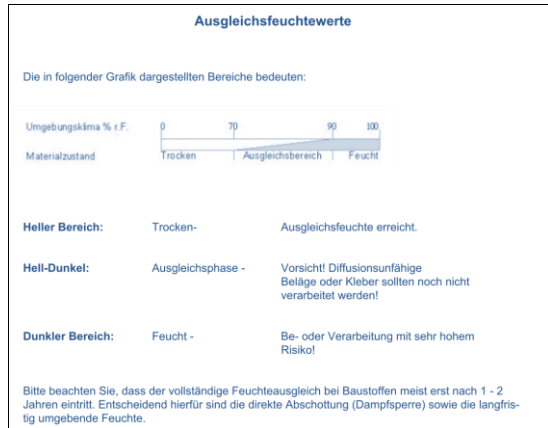
2.2.1 Grundlegendes zur Bauwerksfeuchte

Im Rahmen des Trocknungsprozesses von nass in Gebäuden eingebauten Baustoffen wird ein Teil des Anmachwassers chemisch im Baustoff gebunden (beispielsweise bei der Hydratation zementärer Stoffe). Ein anderer Teil des Anmachwassers wird verdunstet [14].

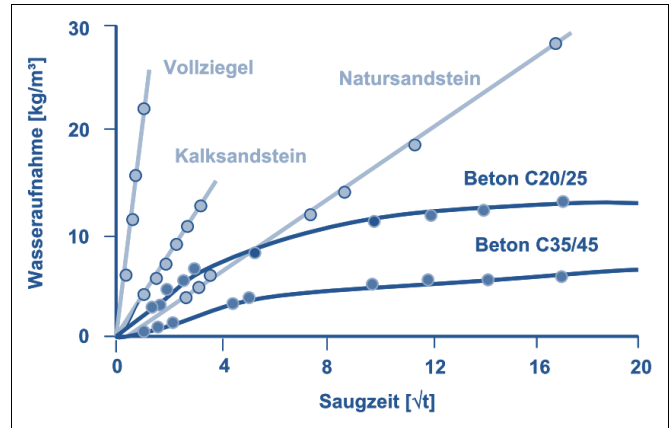
Nach Fertigstellung eines Bauwerks ‚trocknen‘ die feucht eingebauten Bauteile (beispielsweise Mauerwerk) im Laufe von ca. 2 Jahren aus. Dieser Prozess ist beendet, wenn die Bauteile die sogenannte ‚Ausgleichsfeuchte‘ angenommen haben [15].

Die Ausgleichsfeuchte, oder auch Gleichgewichtsfeuchte, ist gemäß den Veränderungen des Raumklimas gewissen Schwankungen unterworfen und grundsätzlich vom Umgebungsklima abhängig [16]. In Abbildung 1a ist der Ausgleichsfeuchtebereich graphisch dargestellt. In Abbildung 2b sind Ausgleichsfeuchte- Werte unterschiedlichen Materialien bei einem Raumklima mit einer relativen

Luftfeuchte von 50% aufgeführt. Diese Werte können vereinfachend als die Wassergehalte von ‚trockenen‘ Baustoffen herangezogen werden, denn sie entsprechen der Ausgleichsfeuchte [U_m in%].



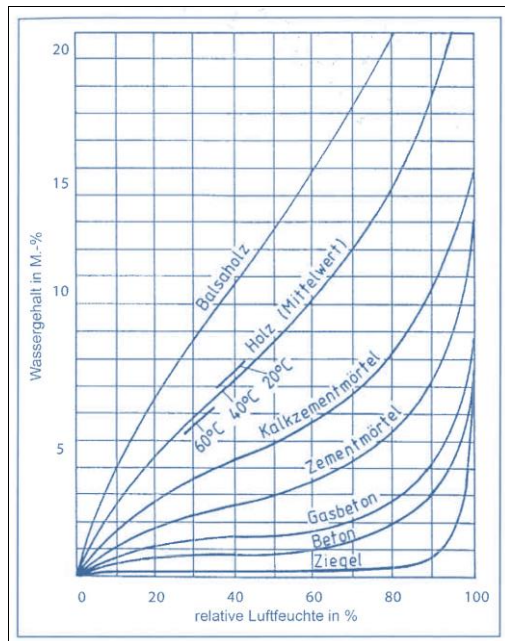
a)



b)

Abbildung 1: a) Illustration zur Ausgleichsfeuchte, Quelle: Bedienungsanleitung Gann Hydromette [17]

b) W-Werte unterschiedlicher Materialien, Quelle: M.Krus, H.M. Künzel: Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen [18]



a)

| Zelle | Baustoffe | Massebezogener Wassergehalt U_m (in %) |
|-------|---|--|
| 1 | Ziegel | 1 |
| 2 | Kalksandstein | 3 |
| 3 | Beton mit geschlossenem Gefüge mit dichten Zuschlägen | 2 |
| 3.2 | Beton mit geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen | 13 |
| 4 | 4.1 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit dichten Zuschlägen nach DIN 4226-1 | 3 |
| 4.2 | Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226-2 | 4,5 |
| 5 | Porenbeton | 6,5 |
| 6 | Gips, Anhydrit | 2 |
| 7 | Gussasphalt, Asphaltmastix | 0 |
| 8 | Anorganische Stoffe in loser Schüttung: expandiertes Gesteinsglas (z. B. Blähperlit) | 1 |
| 9 | Mineralische Faserdämmstoffe aus Glas-, Stein-, Hochofen-Schlacken-(Hütten)- Fasern | 1,5 |
| 10 | Schaumglas | 0 |
| 11 | Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfasern, Schilfrohrplatten und -matten, organische Faserdämmstoffe | 15 |
| 12 | Holzwohle-Leichtbauplatten | 13 |
| 13 | Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegrass, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstigen Fasern | 15 |
| 14 | Korkdämmstoffe | 10 |
| 15 | Schaumkunststoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart) | 1 |

b)

Abbildung 2: a) Sorptions- Isotherme einiger Baustoffe, Quelle: Abdichten von Gebäuden Weber /Hölzen [19];

b) Ausgleichsfeuchte- Werte gem. DIN 4108 T4 bei RH = 50%, Quelle: J. Weber Bauwerksabdichtung in der Altbauanierung [20]

Demgemäß nehmen die unterschiedlichen Baustoffe bei gleicher Relativer Feuchte der Umgebungsluft unterschiedlich viel Feuchte auf. Dieses geschieht durch die Kapillarkondensation der Stoffe. Der hier beschriebene Feuchtetransport findet in den Poren / Kapillaren des Baustoffes statt. Diese nehmen die Feuchte aus dem Raum- oder Außenklima auf und transportieren die Feuchte kapillar weiter. Die Ausgleichsfeuchte ist demgemäß vom Porenraum des Stoffes abhängig. Das Feuchteaufnahme und -abgabeverhalten eines Baustoffes wird in den Sorptions- Isothermen ausgedrückt, wie in Abbildung 2a beispielhaft aufgeführt. Die Fähigkeit eines Baustoffes bei einer bestimmten Relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft, Feuchte aufzunehmen und abzugeben wird in der Sorption beschrieben, bestehend aus Adsorption und Desorption. Jeder Baustoff besitzt seine eigenen Adsorptions- und Desorptions-Isothermen. Der Salzgehalt des Stoffes ist zudem ebenfalls für die Sorptionsvorgänge relevant.

Die Verläufe von Adsorption und Desorption werden Isothermen genannt. Die Vorgänge der Sorption verlaufen auf Grund des Hysterese- Effektes nicht gleich. Dieser Effekt hat mit der Kapillarkondensation des Stoffes zu tun. Nur wenn keine Kapillarkondensation möglich ist, verhalten sich Adsorption und Desorption identisch. In Abbildung 3 sind die Adsorptions- und die Sorptions-Isothermen von Baustoffen beispielhaft aufgeführt.

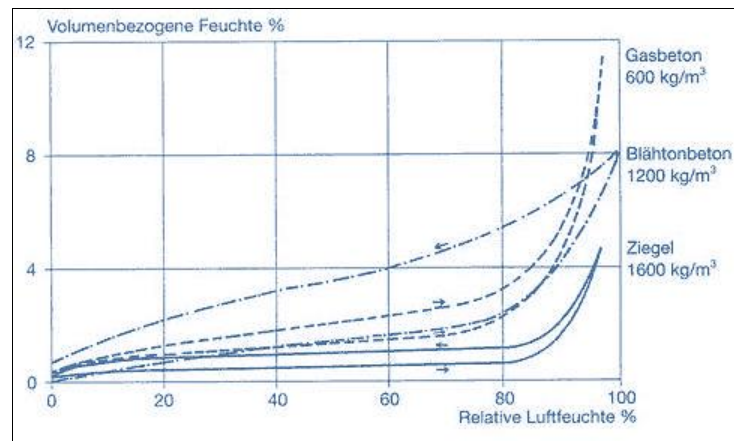
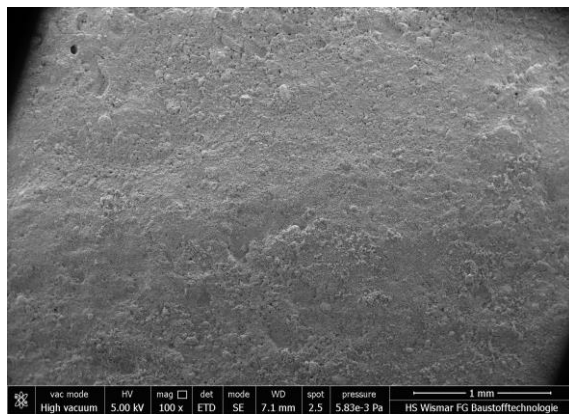


Abbildung 3: Ad- und Desorptionsisotherme von Ziegel und anderen Stoffen,

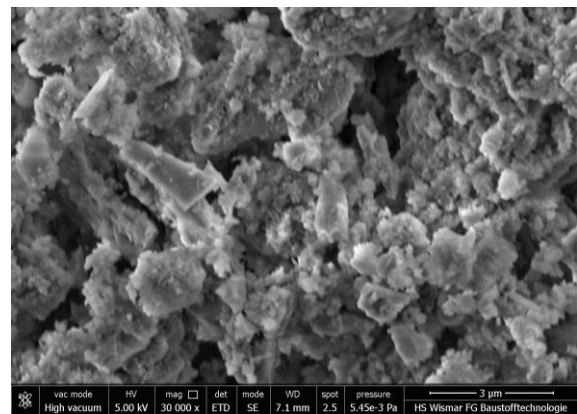
Quelle: Arendt, C., Seele, J., Feuchte und Salze in Gebäuden, 2001 [21]

2.2.2 Porenstrukturen von kapillaraktiven Baustoffen

In Abbildung 4 ist die Porenstruktur des in dieser Arbeit verwendeten Ziegels (Proben Z) in unterschiedlichen Vergrößerungen aufgeführt. Es handelt sich um unbehandelte Proben (Referenzproben).



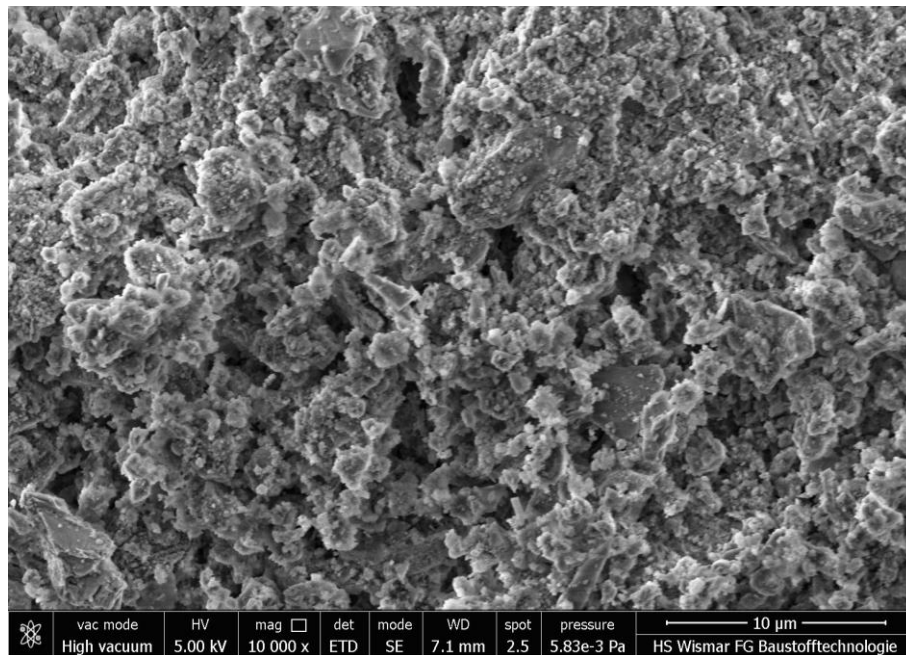
a) Ziegel Z: Porenstruktur, Magnification: 100x



b) Ziegel Z: Porenstruktur, Magnification: 30.000x

Der Wassertransport in Baustoffen ist von deren Porengrößenverteilung abhängig, da beispielsweise bei zu kleinen Poren die Moleküle flüssigen Wassers nicht in die Poren hinein passen. In einem solchen Fall kann ein Feuchtetransport nicht stattfinden. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die Wassermoleküle gegebenenfalls in gasförmigem Zustand in die Poren passen könnten.

Die relevante Porengröße offener, leitfähige Kapillarporen besitzt folgenden Durchmesser:
>> $\varnothing 10^{-7}$ bis 10^{-4} m



c) Ziegel Z: Porenstruktur, Magnification: 10.000x, unbehandelt

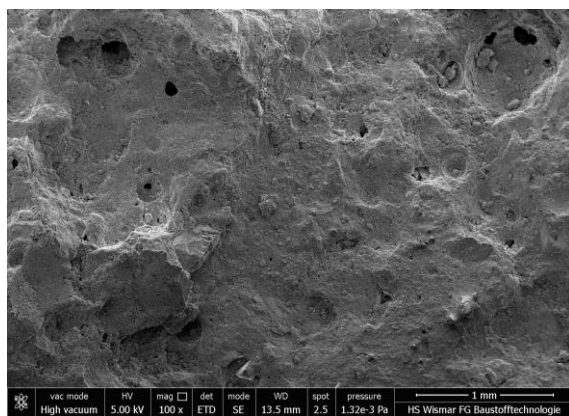
Abbildung 4: a) bis c): REM- Aufnahmen der Porenstruktur von Ziegelproben Z, unbehandelt,

Quelle: P. Körber

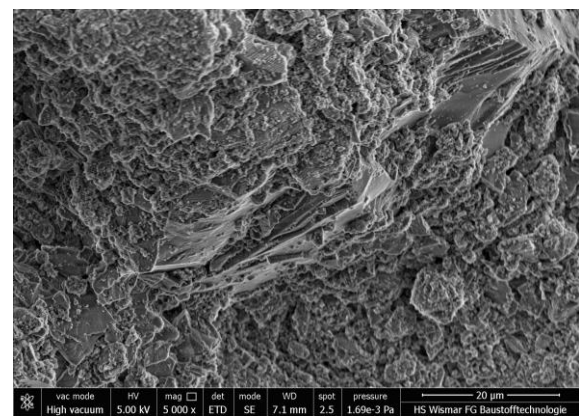
Es besteht folgende Unterteilung der Porengrößen nach ihren Porenradien:

| | | |
|---------------|--|---------------------------------|
| Mikroporen | $\varnothing < 10^{-7} \text{ m}$ | =>keine kapillare Leitfähigkeit |
| Kapillarporen | $\varnothing 10^{-7} \text{ m bis } 10^{-4} \text{ m}$ | =>kapillare Leitfähigkeit |
| Makroporen | $\varnothing \geq 10^{-4} \text{ m}$ | =>kapillar brechend |

Die Größen der Porenradien werden im Allgemeinen mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt. In Abbildung 5 ist die Porenstruktur des hier verwendeten Mörtels (Proben M) in unterschiedlichen Vergrößerungen aufgeführt.

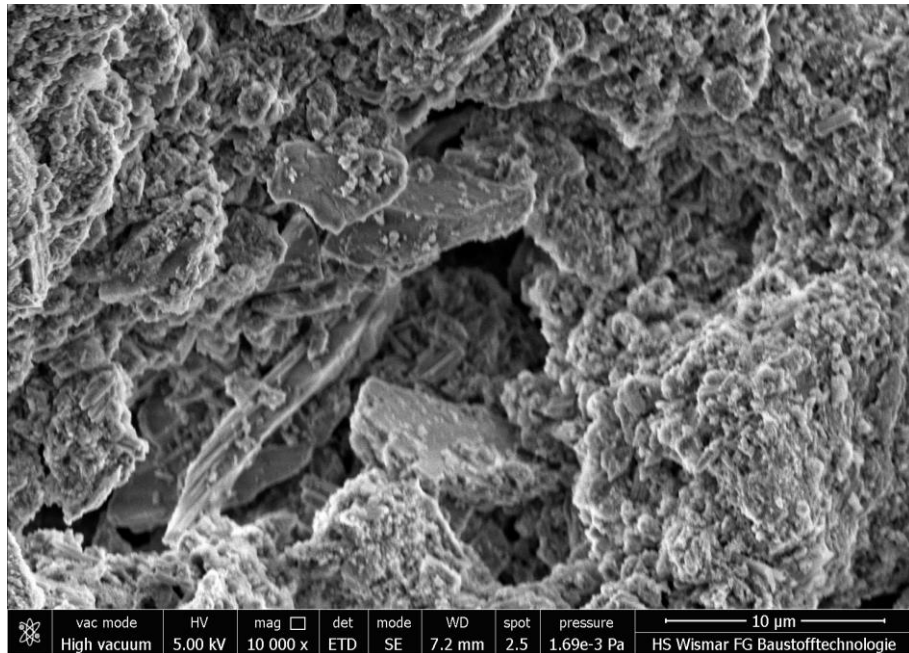


a) Mörtel: Porenstruktur, Magnification: 100x



b) Mörtel: Porenstruktur, Magnification: 5.000x

Kapillaraktive Baustoffe, wie beispielsweise Ziegel besitzen eine Mehrzahl von leitfähigen Kapillarporen. Anders verhält es sich beispielsweise bei Beton, einem zementgebundenen Baustoff mit sehr kleinen Porenradien. Hier ist eine kapillare Weiterleitung nahezu ausgeschlossen, weil die kapillare Saugeschwindigkeit auf Grund der Porengrößen zum Stillstand kommt. In der Abbildung 6 werden die unterschiedlichen Porenarten skizzenhaft erläutert.



c) Mörtel: Porenstruktur, Magnification: 10.000x, unbehandelt

Abbildung 5: a) bis c): REM- Aufnahmen der Porenstruktur von Mörtelproben M, unbehandelt,

Quelle: P. Körber

Porenradien und Porengrößenverteilung beeinflussen das Wassertransportverhalten eines Baustoffes. Das Wasseraufnahme, -weiterleitungs- und -abgabeverhalten eines Stoffes hängt demnach direkt von dem Vorhandensein und der Anzahl der Kapillarporen ab.

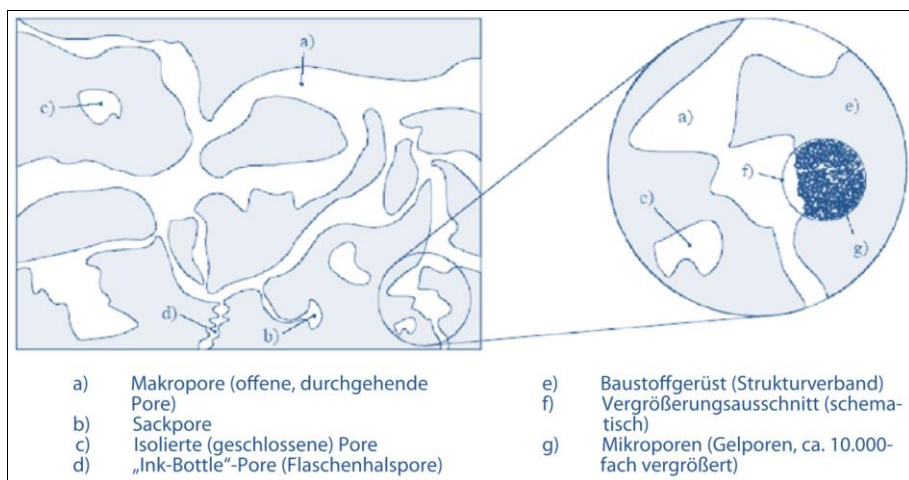


Abbildung 6: Skizzenhafte Erläuterung zu den unterschiedlichen Porenarten eines kapillaren Stoffes,

Quelle: J. Weber, Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung Seite 34 [20]

Insbesondere Ziegel besitzt auf Grund seiner Porenstruktur ein sehr gutes Wassertransportverhalten. Bei Mauermörtel verhält es sich ähnlich. In der Praxis bedeutet das, dass Ziegel und Mauermörtel Wasser schnell aufnehmen und schnell wieder abgeben können. Daher nennt man diese Stoffe auch kapillaraktiv. Da viele flüssige Injektionsmittel ebenfalls kapillar von den Mauerwerksbaustoffen aufgenommen werden sollen, wird bei dem Einsatz dieser Injektionsmitteln die Fähigkeit des Baustoffs Flüssigkeiten kapillar transportieren zu können für den Injektionsvorgang genutzt. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind der Zusammenhang von Wasseraufnahmemechanismen und der Porengröße, sowie die typische Porengrößenverteilung von Baustoffen aufgeführt.

| | | |
|---|---|---|
| Mikroporen $r < 10^{-7}$ m | Kapillarporen $r = 10^{-7}$ bis 10^{-4} m | Makroporen $r > 10^{-4}$ m |
| Kapillarkondensation (Sorptions) Kondensation | Kapillarität Kondensation Hygroskopizität | Sickerwasser Wasseraufnahme unter Druck Kondensation Hygroskopizität |
| Porenradius | | |
| 10^{-9} | 10^{-8} | 10^{-7} |
| 10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} |
| 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} |

Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmemechanismen und Porengröße,

Quelle: Hölzen F.J. / Weber H. Abdichtung von Gebäuden [19]

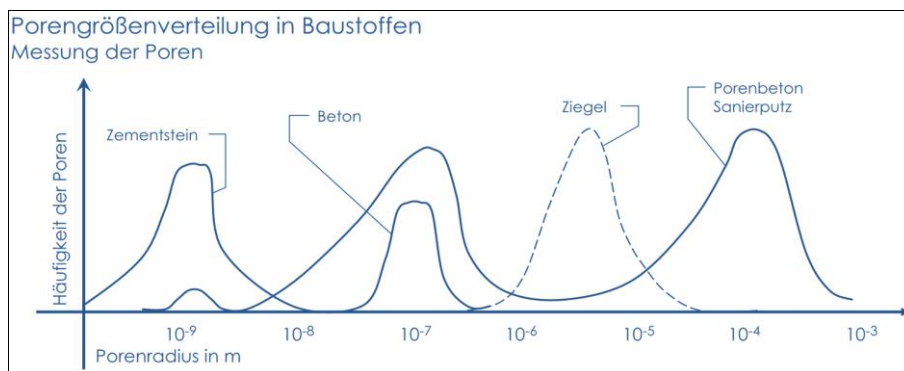
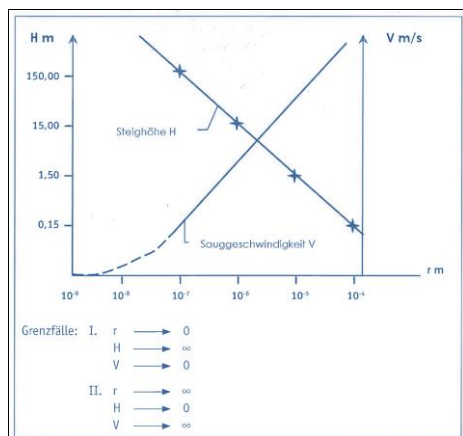


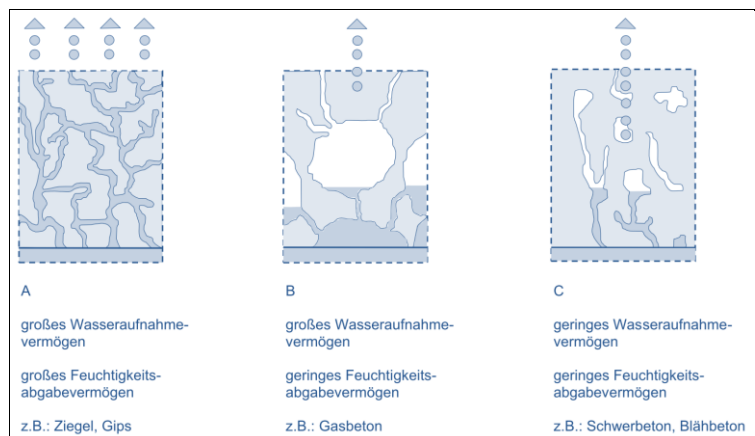
Abbildung 8: Porengrößenverteilung von mineralischen Baustoffen,

Quelle: Weber H., Kompetenzzentrum Bautenschutz & Bausanierung [22]

In Abbildung 9 ist zum einen der Zusammenhang zwischen Kapillarität und Porenradius und zum anderen das Wasseraufnahmevermögen von Baustoffen mit unterschiedlicher Kapillarität dargestellt. Bei dem Wasserabgabevermögen spielt insbesondere das Vorhandensein von Luftporen bei vielen Baustoffen eine entscheidende Rolle.



a)



b)

Abbildung 9: a) Zusammenhang zwischen Kapillarität und Porenradius, Quelle: Hölzen F.J. / Weber H. Abdichtung von Gebäuden [23]; b) Wasseraufnahmevermögen von Baustoffen, Quelle: J. Weber, Bauwerksab. in der Altbausan. Seite 37 [20]

Kapillare Wasseraufnahme

Die maximale kapillare Wasseraufnahme beschreibt die Menge an Wasser, die ein getrockneter Baustoff aufgrund des Gehaltes an Kapillarporen maximal kapillar aufnehmen kann.

Die maximale kapillare Wasseraufnahme wird mit Formel 1 beschrieben:

$$M - \% = \frac{m_s - m_{tr}}{m_{tr}} \times 100$$

m_s = Masse der feuchten Probe

m_{tr} = Masse der trockenen Probe

Formel 1: maximale kapillare Wasseraufnahme

Kapillarer Durchfeuchtungsgrad

Der kapillare Durchfeuchtungsgrad beschreibt die Beziehung zwischen der Durchfeuchtung und der maximalen kapillaren Wasseraufnahme.

Der kapillare Durchfeuchtungsgrad wird mit Formel 2 beschrieben:

$$D_{(g) \text{ kap}} [\%] = \frac{\text{Feuchtegehalt } [M. - \%]}{\text{maximale kapillare Wasseraufnahme } [M. - \%]} \times 100$$

Formel 2: Kapillarer Durchfeuchtungsgrad

Maximale Wasseraufnahme (Sättigungsfeuchte)

Bei der Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme wird der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt. Dieser Vorgang muss unter Druck entweder im Kochverfahren oder im Vakuumverfahren erfolgen.

Die maximale Wasseraufnahme wird mit Formel 3 beschrieben:

$$D_{(g) \text{ ges}} [\%] = \frac{\text{Feuchtegehalt } [M. - \%]}{\text{maximale Wasseraufnahme } [M. - \%]} \times 100$$

$$D_{(g) \text{ ges}} > D_{(g) \text{ kap}}$$

Formel 3: Maximale Wasseraufnahme (Sättigungsfeuchte)

Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme

Zur Abgrenzung von in der flüssigen Phase kapillar aufgenommenem Wasser gegenüber einer hygroskopischen Feuchteaufnahme. Die Abgrenzung erfolgt im Ausschlussverfahren. Die Messung der hygroskopischen Feuchte erfolgt bei konstanter Temperatur/Luftfeuchte

Die hygroskopische Wasseraufnahme wird mit Formel 4 beschrieben:

$$\text{Wasseraufnahme hygroskopisch } M. - \% = \frac{m_{gf} - m_{tr}}{m_{tr}} \times 100$$

m_{gf} = Masse der feuchten Probe nach Wasseraufnahme aus der Luft

m_{tr} = Masse der trockenen Probe

Formel 4: Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme

Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad

Der hygroskopische Durchfeuchtungsgrad beschreibt die Beziehung zwischen der hygroskopischen Durchfeuchtung und der maximalen kapillaren Wasseraufnahme.

Der hygroskopische Durchfeuchtungsgrad wird mit Formel 5 beschrieben:

$$D_{(g) \text{ hyg}} [\%] = \frac{\text{hygroskopischer Feuchtegehalt } [M. -\%]}{\text{maximale kapillare Wasseraufnahme } [M. -\%]} \times 100$$

Formel 5: Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad

2.2.2.1 Stoffliche Bestandteile von Ziegeln und Mörtel

Ziegel [24], [25]

Ziegel wird aus tonhaltigem Lehm geformt und in Öfen gebrannt. Mauerziegel werden aus folgenden Rohstoffen hergestellt:

- Ton
- Magerungs- / Porosierungsmittel
- Wasser

Rohstoff Ziegel

Der Rohstoff von Ziegeln ist Lehm. Dieser ist eine Mischung aus Sand, Schluff und Ton. Ziegel werden bei etwa 900 °C gebrannt und erhalten Beigaben, welche die verschiedenen Ziegelfarben entstehen lassen. Eigenschaften von Mauer- Ziegeln:

- leichte Formbarkeit
- hohe Trockenfestigkeit
- geringe Rohdichte
- gebranntes Produkt
- Tonminerale haben eine ‚Plättchenstruktur‘
- Das Volumen von Ton schwankt mit dem in ihm gebundenen Wasser
- hohe Formbarkeit durch enthaltenes Wasser

Trocknen

Den Ziegeln wird langsam Wasser entzogen. Früher geschah diese durch Lufttrocknung, heute geschieht dies in Trockenkammern. Bei dem Trockenvorgang wird das freie, nicht chemisch gebundene Wasser entzogen.

Brennen und Sintern

- Ziegel brennen bei 400- 500° C
 - erzeugt weiche Ziegelsteine
 - => Entfernung des physikalisch gebundenen Absorptionswassers
 - => Entfernung des Kristallwassers => Wasserbeständigkeit
- Ziegel brennen bei 800- 1000° C
 - erzeugt härtere Ziegelsteine
- Ziegel brennen bei 1200° C =>Klinker
 - lässt die Oberflächen schmelzen => SINTERN
 - es entstehen neue Kristallstrukturen, Verringerung d. Kapillarität => Verklindern
- Die Herstellung von Ziegeln ist das ganze Jahr hindurch möglich
- Mauerziegel gehören zu den keramischen Baustoffen. Durch die Brenntemperatur, die Brenndauer und die stoffliche Zusammensetzung werden die Eigenschaften der Ziegel, wie Festigkeit, Dichte, Porosität und Wasseraufnahme definiert. Ziegel werden in der Regel bei Brenntemperaturen von 900- 1000° C gebrannt. Klinker werden bei 1100°- 1300° C gebrannt.
- Die Herstellung von Ziegeln erfolgt in Tunnelöfen, in denen sie gebrannt werden. Der Brennvorgang erfolgt stufenweise. Zunächst wird mit einer Temperatur von etwa 450 °C begonnen. Hierbei wird das physikalisch gebundene Wasser ausgetrieben. Im nächsten Schritt wird die Temperatur erhöht. Die Grenzflächenreaktionen der Ziegel beginnen bei etwa 800° C. Durch die höhere Temperatur wird eine Verfestigung erreicht. Um die Ziegel zu verdichten wird eine Brenntemperatur von etwa 1000° C bis 1500° C gewählt. Die Verklindern erfolgt ab einer Temperatur von etwa 1200° C. Dabei wird die Oberfläche des Steins versintert, wodurch eine glasartige Struktur auf der Oberfläche entsteht.

Mörtel [26], [27], [28]

Rohstoffe für Mörtel

Die Ausgangsstoffe von Mörtel sind Bindemittel, Zuschläge und Zusatzstoffe bzw. -mittel.

Aktuell werden überwiegend Werkrockenmörtel, die vor Ort unter Beigabe von Wasser zu Frischmörtel verarbeitet werden, verwendet. Historisch wurden Mörtel örtlich nach Raumteilen gemischt. Werkmauermörtel wird nach DIN 1053 (Mauerwerks-DIN) in drei Mörtelgruppen (MG) und zwei Untergruppen nach Druckfestigkeit des errichteten Mauerwerks unterschieden:

- MG I (Kalkmörtel)
- MG II (Kalkzement/hydraulischer Mörtel, 2,5 N/mm²)
- MG IIa (Kalkzementmörtel, 5 N/mm²)
- MG III (Zementmörtel, 10 N/mm²)
- MG IIIa (Zementmörtel, 20 N/mm²)

2.2.3 Feuchtebelastungen von Bauteilen / Baustoffen

Die Arten der Feuchtebelastung der hier beschriebenen Baustoffe, Ziegel und Mörtel geschieht auf Grund von flüssiger und gasförmiger Wasseraufnahme. [29]. Nachfolgend sind die Arten der Feuchteaufnahme / Wasseraufnahme aufgeführt:

Wasseraufnahme flüssig:

- Schlagregen
- Sickerwasser
- Kapillar aufsteigende Feuchte
>> Saugfähigkeit

Wasseraufnahme gasförmig:

- Kondensation
- Kapillarkondensation
- Hygrokopizität auf Grund von Salzen

2.2.3.1 *Durchfeuchtungsprofile von Mauerwerken*

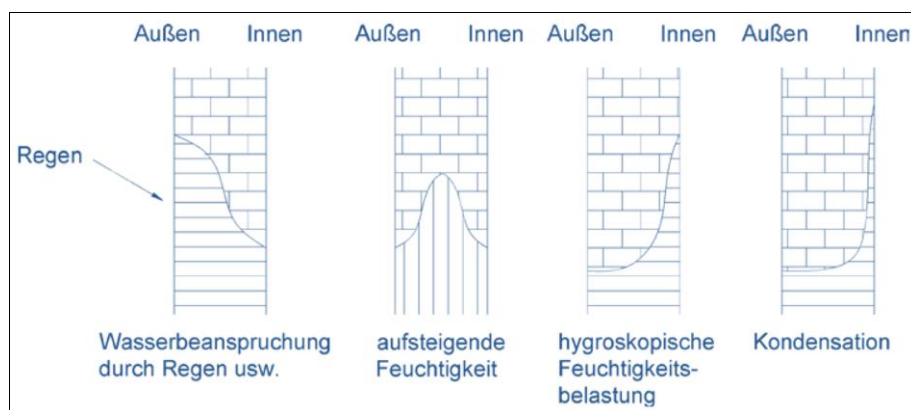


Abbildung 10: Durchfeuchtungsprofile von Mauerwerken,

Quelle: J. Weber, Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung Seite 119 [20]

In Abbildung 10 sind unterschiedliche Durchfeuchtungen eines Mauerwerks im Querschnitt dargestellt. Es ist aus diesen systematischen Durchfeuchtungsszenarien einer Mauerwerkswand in Abbildung 10 ersichtlich, dass sowohl Bauwerks-Abdichtungsmängel, als auch klimatische Ursachen (zu feuchtes Raumklima), sowie eine zu hohe Salzbelastung als Folge lang anhaltender intensiver Durchfeuchtungen, bei der Ursache für die Durchfeuchtung eines Mauerwerks eine Rolle spielen können. Das Durchfeuchtungsszenario ‚aufsteigende Mauerwerksfeuchte‘, das auf Bauwerks-Abdichtungsmängeln beruht, kann mittels Einbau einer nachträglichen Querschnittsabdichtung (sofern diese nicht vorhanden ist) unter gleichzeitiger Anwendung weiterer Abdichtungsmaßnahmen abgestellt werden.

2.2.3.2 Aufsteigende Feuchte in kapillaren Mauerwerken

Unter aufsteigender Mauerwerksfeuchte versteht man üblicher Weise einen lang anhaltenden Zustand der kapillaren Weiterleitung von Feuchte in Mauerwerken. Diese Weiterleitung geschieht zwar grundsätzlich in alle Richtungen. Da es sich bei Mauerwerken aber um vertikale Baustrukturen handelt und sich der hauptsächliche Feuchteangriff an Mauerwerken im unteren Erdkontakt-Bereich befindet, besteht die wesentliche selbsttätige kapillare Weiterleitung von Feuchte im Mauerwerk in vertikale Richtung. Insofern steigt die Feuchte auf. Die aufsteigende Feuchte wird durch fehlende Bauwerks-Abdichtungsebenen verursacht, hier fehlende Querschnittsabdichtung in der Mauerwerkswand [30]. Üblicher Weise stellen sich bei aufsteigender Feuchte im unteren Sockel-Bereich des Mauerwerks mit Erdkontakt hohe Durchfeuchtungsgrade ein, welche nach oben hin abnehmen.

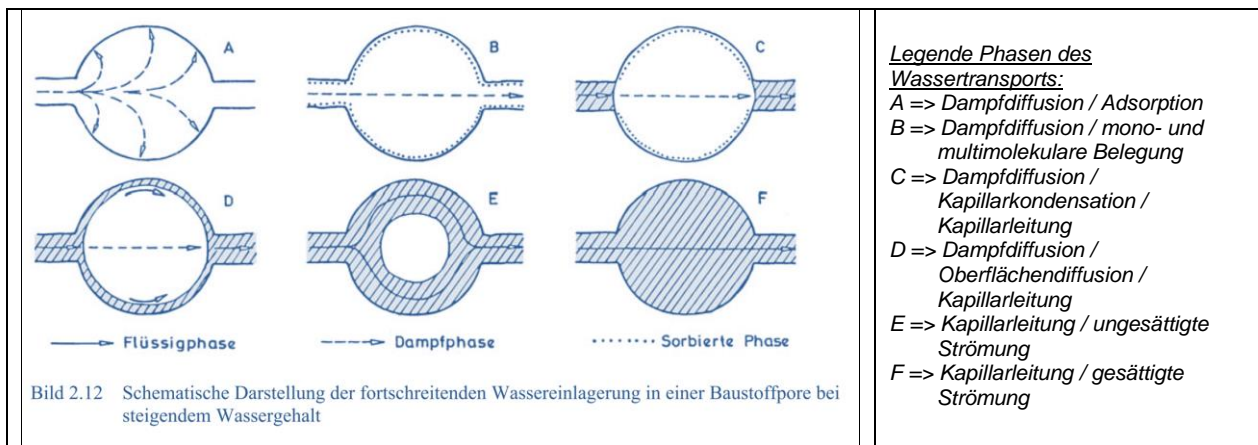


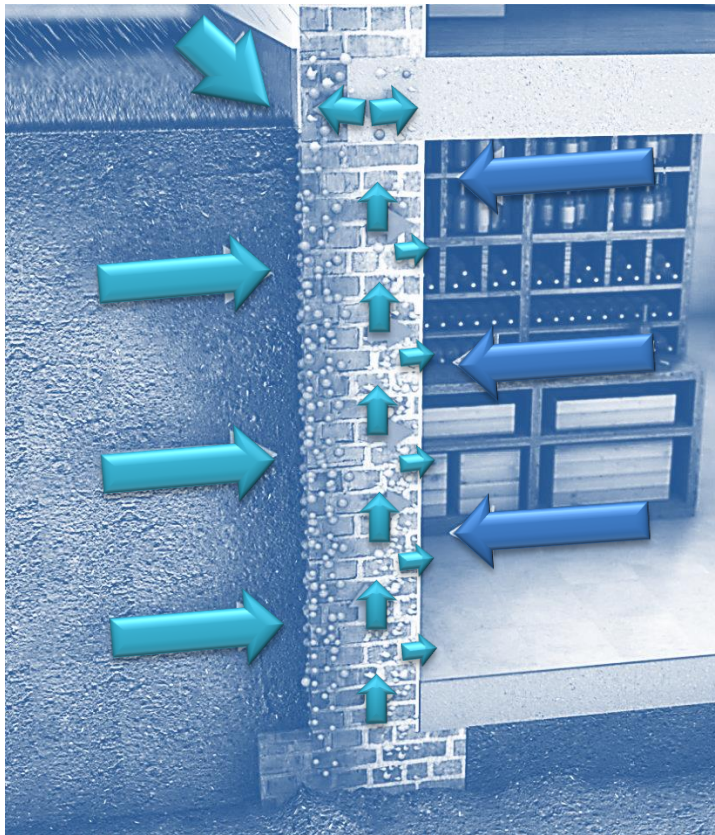
Abbildung 11: Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt,

Quelle: Fischer u.a., Lehrbuch der Bauphysik 6. Aufl. [31]

In der Abbildung 11 werden die Feuchtetransport- Mechanismen in Poren bei zunehmender Durchfeuchtung skizzenhaft dargestellt. Es wird in die dargestellten Stadien A bis F unterschieden, bis der Wassertransport letztendlich dem Darcy'schen Gesetz folgt (=Phase F), weil dann eine gesättigte Strömung besteht. Darcy hat bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Gesetzmäßigkeit der Strömungsmechanik beschrieben. Das Darcy-Gesetz besagt, dass die Wassermenge Q , die eine gesamte Querschnittsfläche A (Porenraum + Matrix) eines porösen Mediums laminar durchströmt, direkt proportional ist zum hydraulischen Gradienten i ist. Das Darcy- Gesetz beschreibt im Wesentlichen die Hydrologie von Böden. Durch Umstellung der Gleichung ergibt sich die Definition des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f . Dieser Wert ist wichtig um die Durchlässigkeit von Böden zu beschreiben. Bei am Objekt anstehenden Böden gibt der Durchlässigkeitsbeiwert k_f Auskunft darüber in welcher Qualität eine Bauwerksabdichtung ausgeführt werden muss. Die Definition des Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist in 2.2.3.5 und in Tabelle 1 aufgeführt.

Die wichtigsten Beeinträchtigungen auf Grund von aufsteigender Mauerwerksfeuchte bestehen in folgenden Schadensszenarien [32]:

- Lang anhaltende hohe Durchfeuchtung des Mauerwerks und des Innenputzes
- Geruchsbelästigungen
- Etwaiger Schimmelpilzbefall
- Etwaiger Befall mit Holzschädlingen, wenn Holzbauteile involviert sind
- Vermehrte Salztransporte löslicher Salze im Mauerwerksquerschnitt
- Oberflächliche Salzkonzentration
 - Kristallisation der Salze auf der Wandoberfläche durch Verdunstungsprozesse
 - Schäden an Putzen, Beschichtungen und am Mauerwerk selbst durch den Kristallisationsdruck, auf Grund der Salzkonzentration
 - Bildung von Salztaschen
 - Abschalungen
 - Abplatzungen
 - Farbveränderungen
 - Zermürbung des Fugennetzes



Bezüglich der maximalen Steighöhe von aufsteigender Feuchte, bestehen bei konventionellen, kapillaren Mauerwerken noch keine belastbaren wissenschaftlichen Aussagen. Auf Grund der Gegenkraft aus der Gravitation kann jedoch von einer maximalen Steighöhe aufsteigender Feuchte von etwa 1,5 m ausgegangen werden. Vielfach überlagern sich an einem Altbau- Außenmauerwerk auf Grund fehlender Bauwerksabdichtungen die unterschiedlichen Durchfeuchtungs-ursachen [33], [34]:

- aufsteigende Feuchte (fehlende Querschnittsabdichtung)
- horizontaler Feuchteangriff (fehlende Vertikalsperre) und
- hygroskopische Auffeuchtung (hoher Salzgehalt)

In Abbildung 12 wird der Feuchteangriff auf ein Kellermauerwerk, das keine Bauwerksabdichtungen besitzt, illustriert.

Abbildung 12: Aufsteigende Feuchte, Quelle: Produktunterlagen der Fa. Remmers [35]



a)



b)



c)



d)



e)



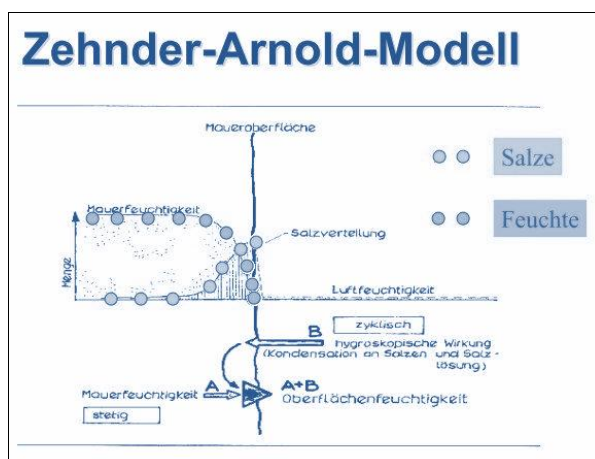
f)

Abbildung 13: a) bis f) Folgen langanhaltender aufsteigender Mauerwerksfeuchte mit einhergehender Salzbelastung und den entsprechenden Schäden daraus, Quelle: P. Körber

In Abbildung 13 werden typische Schäden aus aufsteigender Mauerwerksfeuchte auf Grund fehlender / unzulänglicher Bauwerksabdichtungen an Ziegelwänden gezeigt. Alle hier gezeigten Schadensfälle gehen mit einer hohen, durch den Feuchtetransport bedingten, Feuchtebelastung von Mauerwerk und Putz durch leichtlösliche, bauschädliche Salze, einher.

2.2.3.3 Bauschädliche Salze auf Grund hoher Feuchtebelastung

Als bauschädliche Salze sind diejenigen Salze relevant, die im Baustoff leicht löslich / wasserlöslich sind und daher auf Grund der Feuchtebelastung des Mauerwerks, im Baustoff angelöst und durch das nach außen strebende Wasser mittransportiert werden können. Es handelt sich bei den bauschädlichen Salzen überwiegend um Chloride, Sulfate und Carbonate (seltener um Nitrate), die zunächst regulär im Baustoff gebunden waren [36], [37]. Die im Mauerwerk befindliche Feuchte wird auf Grund des Dampfdruckgefälles zur Verdunstung an die Bauteiloberfläche transportiert. Hier geschieht der Verdunstungsprozess des Wassers durch Phasenumwandlung. Die im Wasser gelösten und mittransportierten Salze verbleiben auf der Bauteiloberfläche was, wie in Abbildung 14 dargestellt, zur Salzkonzentration auf der Bauteiloberfläche führt.



a)



b)

Abbildung 14: a) Konzentration von Salzen auf der Wandoberfläche einer lang anhaltend durchfeuchteten Mauerwerkswand, Quelle: HS Wismar FB Bautenschutz: Sanierungsbaustoffe; b) Beispiel einer Salztasche an einem geputzten und beschichteten Kellermauerwerk aus kapillaren Baustoffen (Innenseite Außenwand), Quelle: P.Körber

In Abbildung 14a ist die durch den Feuchtetransport hervorgerufene Salzkonzentration auf der Bauteiloberfläche erläutert. Diese Salzkonzentration führt zu den in Abbildung 14b gezeigten typischen Schäden, wie Salztaschen unter dem Putz. Die von der Bauteilfeuchte angelösten Salze kristallisieren an der Bauteiloberfläche aus. Bei diesem Kristallisationsprozess wird das Volumen auf Grund des Kristallisationsdrucks erheblich vergrößert. Aus diesem Grund werden die obersten Bauteilschichten (insbesondere Innenputz und Wandfarbe) erhöhten Spannungen ausgesetzt. Da diese Schichten die Spannungen aus dem Kristallisationsdruck nicht aufnehmen können, kommt es zur Schädigung. Es bilden sich zunächst Hohlräume / Beulen mit Salzkristallen (Salztaschen), dann reißen diese auf und der Putz / die Farbe fällt ab, oder blättert ab. Die Salze bleiben auf der Oberfläche zurück.

Die an der Oberfläche konzentrierten Salze sind für das Bauwerk insofern problematisch, weil sie neben den oben beschriebenen Schäden, folgende Eigenschaften besitzen:

- Die Salze sind hygroskopisch
 - Das heißt, dass die Salze selbstständig Feuchte aus der Umgebungsluft aufnehmen und dadurch das Bauteil ihrerseits auffeuchten (= Hydratation)
 - Hierdurch entsteht der ebenfalls schädliche Hydratationsdruck (=Aufnahme und Abgabe von Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen)

Während im Baustoff, durch kapillare Wassertransporte bedingt, Salze gelöst worden sind und diese sich an der Bauteiloberfläche konzentrieren, können diese Salze zudem die Gleichgewichtsfeuchte entscheidend beeinflussen. Ein mit hygroskopisch wirkenden Salzen belastetes Bauteil kann daher ein Vielfaches der Gleichgewichtsfeuchte an Wasser aus der Umgebungsluft einlagern und die hygroskopische Wasserbelastung kann auf diese Weise die kapillare Wasseraufnahme weit übertreffen. Nachfolgend sind in Abbildung 15 die wichtigsten bauschädlichen Salze aufgeführt:

| | |
|--|--|
| Sulfatverbindungen $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ $CaSO_2 \cdot 2 H_2O$ $Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$ | Bittersalz, Magnesiumsulfat Gips, Calciumsulfat Glaubersalz, Natriumsulfat |
| Nitratverbindungen $Mg(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$ $5 Ca(NO_3)_2 \cdot 4 NH_4NO_3 \cdot 10 H_2O$ | Magnesiumnitrat Calciumnitrat Kalksalpeter |
| Chloridverbindungen $CaCl_2 \cdot 6 H_2O$ $NaCl$ | Calciumchlorid Kochsalz, Natriumchlorid |
| Carbonatverbindungen $Na_2CO_3 \cdot 10 H_2O$ K_2CO_3 | Soda, Natriumcarbonat Pottasche, Kaliumcarbonat |

Abbildung 15: Die wichtigsten bauschädlichen Salze im Überblick,

Quelle: Hölzen F.J. / Weber H. Abdichtung von Gebäuden [23]

2.2.3.4 Abdichtungsebenen bei Gebäuden

Um aufsteigende Feuchte an kapillaren Mauerwerken von Gebäuden zu verhindern sind Bauwerksabdichtungen in verschiedenen Abdichtungsebenen von Gebäuden erforderlich [38], [39], [40], [41], [42]. Nachfolgend werden die an Bauwerken grundsätzlich erforderlichen Sperr-Ebenen erläuternd aufgeführt.

Bauwerksabdichtung von Gebäuden: Zuordnung der Abdichtungsebenen [43], [44], [45]

Querschnittsabdichtung in der Wand = **Q-Sperre**

- Diese Abdichtung verhindert, dass in der Wand, bedingt durch die kapillaren Kräfte im Baustoff, Feuchte aufsteigt (=Verhinderung von aufsteigender Feuchte)

Vertikale Sockelabdichtung auf der Außenwand = **V- Sperre**

- Diese Abdichtung verhindert, dass an der Fassade herab laufendes Niederschlagswasser und Oberflächenwasser, sowie Spritzwasser in das Sockelmauerwerk / Kellermauerwerk eindringen kann (= Verhinderung des seitlichen Feuchteangriffs)

Horizontale Abdichtung auf der Sohle = **H- Sperre**

- Diese Abdichtung verhindert, dass über die Sohle Feuchte aufsteigt / eindringt (=Verhinderung des Feuchteangriffs von unten)

Die genannten Abdichtungen stellen ein grundsätzliches System zur Bauwerksabdichtung dar. Die Dichtebenen müssen über Gelände oder von wasserdicht nach wasserdicht geführt werden. Die Qualität der einzelnen Abdichtungsebenen wird durch den Lastfall für die Bauwerksabdichtung bestimmt [46], [47], [48], [49].

2.2.3.5 Lastfallbestimmung der Bauwerksabdichtung

Anhand der Lastfallbestimmung für die entsprechende Bauwerksabdichtung [50] soll dargelegt werden, welchen tatsächlichen Belastungen die Bauwerksabdichtung eines Gebäudes ausgesetzt ist. Diese Belastung der Abdichtung durch Wasser wird ‚Lastfall‘ genannt [51]. In Abbildung 16 sind die Abdichtungsarten und Lastfälle illustriert. Bei der Frage nach den Lastfällen [50] muss grundsätzlich unterschieden werden in:

- Bodenfeuchtigkeit
- drückendes Wasser

Hierbei ist wesentlich, inwieweit die Bauwerksabdichtung einem hydrostatischen Druck ausgesetzt ist. Bei dem Lastfall ‚Bodenfeuchtigkeit‘ wird kein hydrostatischer Druck auf die Abdichtung ausgeübt. Es ist zwar Feuchte im Boden vorhanden (diese ist grundsätzlich immer anzunehmen, daher beschreibt der Lastfall ‚Bodenfeuchtigkeit‘ den Mindestlastfall), diese ‚Bodenfeuchtigkeit‘ hat jedoch nicht die Tendenz ‚drückend‘ in das Bauwerk einzudringen.

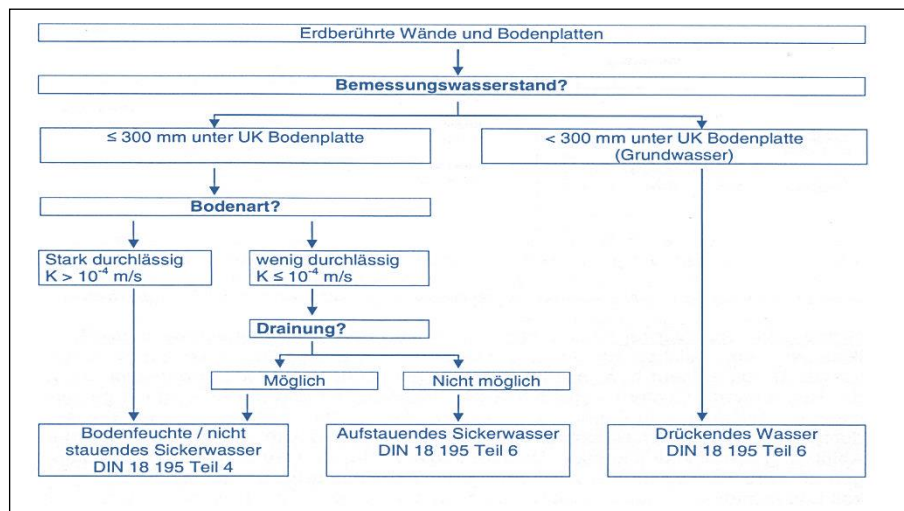


Abbildung 16: Einteilung der Abdichtungsarten nach der graphischen Darstellung der Lastfälle,

Quelle: DIN 18195 [50]

Anders verhält es sich bei dem Lastfall ‚drückendes Wasser‘. Hier übt die anstauende, im Boden befindliche Wassermasse einen hydrostatischen Druck (Wasserdruck) auf die Bauwerksabdichtung aus und hat die Tendenz in das Bauwerk einzudringen. Dieses wird durch die Art der Ausführung und die Qualität der Abdichtung verhindert. An eine Abdichtung, die drückendem Wasser standhalten können muss, werden höhere Anforderungen, als an eine Abdichtung des Lastfalls ‚Bodenfeuchtigkeit‘ gestellt. Eine Besonderheit stellt in diesem Zusammenhang eine Drainage dar. Bei Einsatz einer fachlich richtig ausgeführten und funktionierenden Bauwerks-Drainage würde der hydrostatische Druck durch das Abführen des Wassers mittels Drainage genommen und der Lastfall ‚drückendes Wasser‘ könnte auf

den Lastfall ‚Bodenfeuchtigkeit‘ reduziert werden. Zur Lastfall- Unterscheidung in ‚drückendes Wasser‘ und ‚nicht drückendes Wasser‘ werden grundsätzlich folgende Parameter untersucht:

- Durchlässigkeit der anstehenden Böden
 - Durchlässigkeitsbeiwert k_f des Bodens
- Grundwasserstand auf dem Gelände in unmittelbarer Nähe zum Gebäude
 - Einstandstiefe (Eintauchtiefe) des Gebäudes in das Grundwasser

Grundsätzliches zur Durchlässigkeit von Böden [52]

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f eines Bodens bezeichnet dessen hydraulische Leitfähigkeit. Kann nicht genügend Wasser in einer bestimmten Zeit durch den Baugrund abgeleitet werden, so staut dieses am Bauwerk auf. Es wird daher bezüglich der Bauwerksabdichtung grundsätzlich unterschieden zwischen:

- stauendem Wasser und
- nicht stauendem Wasser

Das Kriterium für die Lastfallbestimmung einer Bauwerksabdichtung auf einem Grundstück ist der Versickerungsbeiwert:

- k_f - Wert

Je kleiner die einzelnen Körner der Bodenschichten sind, desto dichter ist der Erdstoff. Bei dichten Erdstoffen nimmt die Versickerungsfähigkeit des Bodens ab.

Die diesbezügliche Grenze der Versickerungsfähigkeit ist bei einer Korngröße definiert:

- Korngröße $k_f > 10^{-4}$

Bei Korngrößen ab $k_f > 10^{-4}$ wird von gut versickernden Böden gesprochen. Durch den Einsatz einer Bauwerks-Drainage kann ein Lastfall mit drückendem Wasser auf den Lastfall ‚Bodenfeuchte‘ abgesenkt werden. In Tabelle 1 sind die Durchlässigkeiten von Böden bei bestimmten Korngrößen des Erdstoffs aufgeführt. Stehen im Baugrund Böden mit einem k_f - Wert von besser als $k_f = 10^{-4}$ an, so sind die Böden gut versickerungsfähig: Es besteht der Lastfall Bodenfeuchte. Sind Böden mit schlechteren Versickerungseigenschaften vorhanden (dichtere, bindige Böden), so liegt ein Lastfall mit mindestens temporär drückendem Wasser oder höher vor.

| Durchlässigkeit des Bodens | Sehr stark durchlässig | Stark durchlässig | durchlässig | Schwach durchlässig | Sehr schwach durchlässig |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Durchlässigkeitsbeiwert k_f | $> 10^{-2}$ | 10^{-2} bis 10^{-4} | 10^{-4} bis 10^{-6} | 10^{-6} bis 10^{-8} | $< 10^{-8}$ |

Tabelle 1: Böden mit einem k_f - Wert von 10^{-4} bis 10^{-6} sind ausreichend durchlässig:

Die Bauwerksabdichtung darf nach dem Lastfall ‚Bodenfeuchte‘ erfolgen, Quelle: nach DIN 18130 [53]

Das hier diskutierte Verfahren zur nachträglichen Bauwerksabdichtung an kapillaren Mauerwerkswänden, mittels Applikation von Injektionsmitteln, kann ausschließlich nur dann angewendet werden, wenn es sich um den Lastfall ‚Bodenfeuchte‘, also um nicht drückende aufsteigende Mauerwerksfeuchte handelt. Der Lastfall drückendes Wasser kann auf diese Weise nicht nachträglich abgedichtet werden.

2.3 Nachträgliche Bauwerksabdichtung mittels Injektionsmitteln

2.3.1 Grundsätzliches zu nachträglichen Bauwerksabdichtungen

Die Techniken zum Einbau nachträglicher Bauwerksabdichtungen werden insbesondere bei Altbauten eingesetzt, bei denen funktionierende Bauwerksabdichtungen nicht vorhanden sind und deren Nutzung geändert wird oder bei denen zukünftig höhere Anforderungen an die Nutzung bestehen sollen. Zudem werden solche Verfahren zum Werterhalt schützenswerter Bausubstanz eingesetzt. Daher spielen in diesem Zusammenhang denkmalgeschützte Gebäude eine gewichtige Rolle. Grundsätzlich können alle Bauwerks-Abdichtungsaufgaben mit Hilfe der zutreffenden technischen Lösung auch nachträglich eingesetzt werden. [54], [55], [56], [57], [58]

2.3.2 Nachträgliche Querschnittsabdichtungen

Es sind diverse Wege bekannt, nachträgliche Querschnittsabdichtungen (Q-Sperre) zu realisieren [59], [60], [61]. Es bestehen mechanische Verfahren, bei denen die fehlende Querschnittsabdichtung im Mauerwerk mittels dem nachträglichem Einbau von Folien oder Blechen realisiert wird. Zudem werden Verfahren, wie beispielsweise das Mauerersatzverfahren eingesetzt, bei dem das Mauerwerk abschnittsweise entfernt und unter Einbau einer Mauersperrfolie wieder ergänzt wird. Ein anderes mechanisches Nachrüstverfahren ist das Mauer-Sägeverfahren, bei dem das Mauerwerk abschnittsweise aufgeschnitten wird um sodann Bleche eintreiben zu können. Diese mechanischen Verfahren zur Nachrüstung einer fehlenden Q-Sperre benötigen allesamt einen hohen apparatetechnischen oder/und hohen personellen Aufwand. Zudem können die mechanischen Nachrüstverfahren nicht an allen (verdeckten, oder nicht zugänglichen) Mauerwerksbereichen eingesetzt werden. Es besteht daher der Bedarf die nachträgliche Mauerwerks-Querschnittsabdichtung auf einem anderen Wege realisieren zu können. Aus diesem Grund wurde das Mauerwerks-Injektionsverfahren zur nachträglichen Bauwerksabdichtung entwickelt.

2.3.3 Einbau einer nachträglichen Querschnittsabdichtung unter Anwendung von Injektionsmitteln

Grundsätzlich bestehen diverse Wege und Techniken die nachträgliche Injektionsmittel- Abdichtung zu realisieren. Die Injektionsverfahren an Mauerwerken decken einen klar umrissenen Einsatzbereich der nachträglichen Abdichtungen ab [62], [63]. Um solche Injektionsmittelabdichtungen technisch richtig, wirtschaftlich und im Sinne der geforderten Wirksamkeit, gemäß den zuvor definierten Abdichtungszielen richtig einsetzen zu können bestehen folgende Parameter:

- Einsatz nachträglicher Querschnittsabdichtungen an kapillaren Mauerwerken durch Bohrlochinjektionen bei Vorliegen des Lastfalls Bodenfeuchte. Bei Vorliegen des Lastfalls ‚aufstauendes Sickerwasser‘, ist zusätzlich der Einsatz einer Gebäude-Dränage erforderlich
- Einsatz der Injektionsmittelabdichtung: Einseitig oder beidseitig im Bohrlochverfahren
- Applikation der Injektionsmittel unter Mitteldruck, im Niederdruckverfahren oder im drucklosen Verfahren
- Die Abdichtung flächiger Mauerwerksbereiche ist als sogenannte Schleierinjektion möglich. Es besteht in diesem Fall ein sehr hoher Materialbedarf an den eingesetzten Injektionsmitteln

Bei der Anwendung von Injektionsmitteln im Bohrlochverfahren werden in einem bestimmten Winkel oder horizontal Bohrlöcher einer definierten Größe in einem definierten Abstand ein- oder zweireihig gesetzt. In diese Bohrlöcher werden die Injektionsmittel appliziert. Nachfolgend ist in Abbildung 17 die Applikation einer Bohrlochinjektion einreihig und zweireihig systematisch dargestellt.

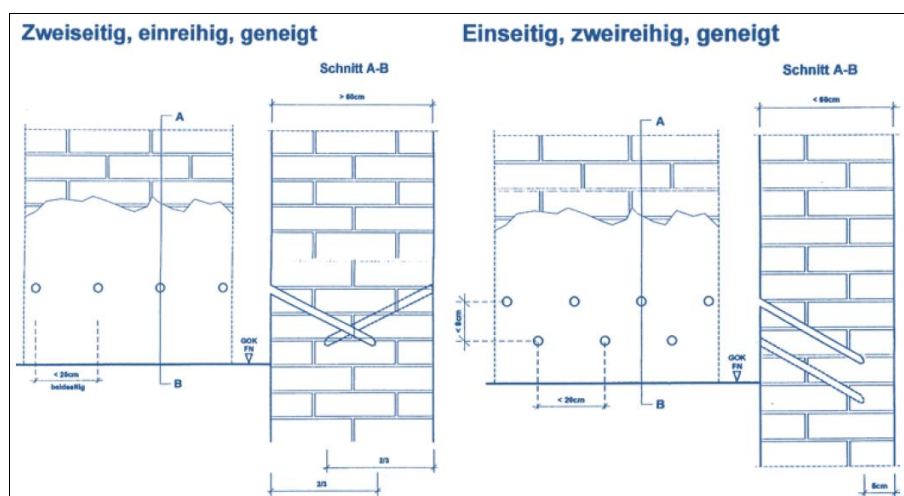


Abbildung 17: Systematische Darstellung der einreihigen und zweireihigen Bohrlochinjektion,

Quelle: J. Weber, Bauwerksabdichtung in der Altbauanierung Seite 217 (analog WTA) [20]

Bei der Herstellung einer nachträglichen Querschnittsabdichtung, in einem bestehenden kapillaren Mauerwerk, mittels Bohrlochinjektionen soll durch die Applikation der Injektionsmittel in der Injektionsebene ein horizontal verlaufender, abdichtender ‚Balken‘ im Mauerwerk entstehen. In der Injektionsebene soll die kapillare Weiterleitung von Wasser verhindert oder eingeschränkt werden.

2.3.4 Wirkweise von Injektionsmitteln zur Bauwerksabdichtung

Es bestehen folgende grundsätzliche Wirkweisen von Injektionsmitteln, die zur nachträglichen Bauwerksabdichtung an kapillaren Mauerwerken eingesetzt werden [64]:

- Kapillar verfüllende Injektionsmittel
- Kapillar verengende Injektionsmittel
- Kapillarporen- hydrophobierende Injektionsmittel
- Kapillarporen- hydrophobierende und porenverengende Injektionsmittel

Die wichtigsten Inhaltstoffe von Injektionsmitteln zur nachträglichen Abdichtung:

- Alkasilikate / Alkalimethylsilikonate
- Epoxidharze
- Paraffine
- Polyacrylatgele
- Polyurethanharze
- Silane / Siloxane
- Silikonate
- Silikonmikroemulsionen

Die Inhaltsstoffe der Injektionsmittel sind ein- oder mehrkomponentig. Sie reagieren chemisch und wirken physikalisch. Es bestehen derzeit in Europa über 150 verschiedene Injektionsmittelprodukte. In Abbildung 18 sind die Wirkmechanismen von Injektionsmitteln zur nachträglichen Bauwerksabdichtung dargestellt. Die wichtigsten Mechanismen sind:
>> verstopfen, verengen und hydrophobieren.

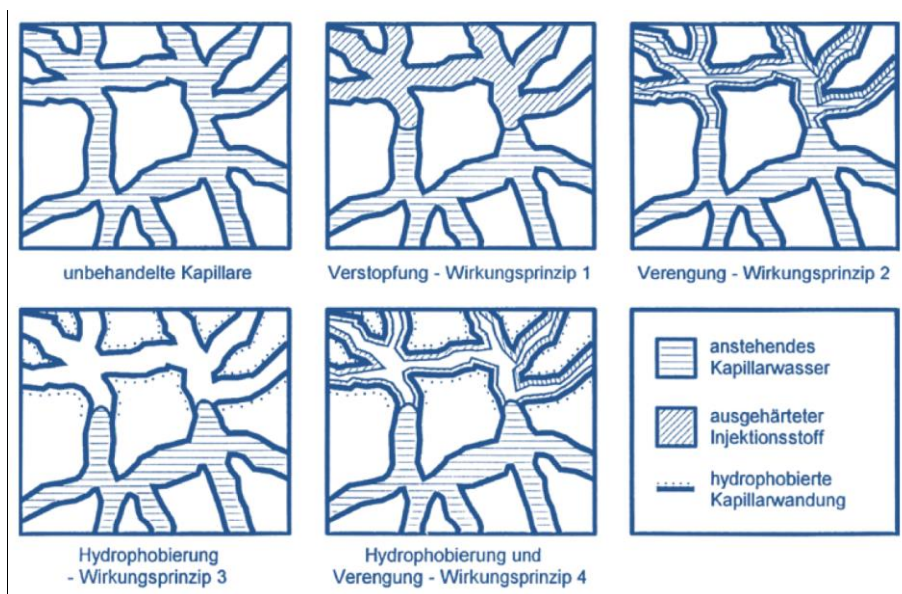


Abbildung 18: Wirkmechanismen von Injektionsmitteln zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung,

Quelle: Quelle: J. Weber, Bauwerksabdichtung in der Altbauanierung Seite 207 [20]

Eine große Gruppe der Injektionsmittel stellen die hydrophobierenden und zugleich porenverengenden Mittel dar. Der bei der Hydrophobierung wesentliche Chemismus basiert hier auf dem Einsatz von Silanen und Siloxanen. Diese reagieren mit Feuchtigkeit und werden zu Silikonharz umgebildet.

Die kapillare Struktur eines Baustoffs ist ursächlich für seine Wasseraufnahme. Es kommt bei dem Wasseraufnahmeprozess zu einer Wechselwirkung zwischen der Wasseroberfläche der eindringenden Feuchte und den Oberflächen der Kapillarwände. Die kapillare Steighöhe wird in Formel 6 ausgedrückt:

$$h [cm] = \frac{2 \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$$

| | | |
|------------------------------|---|--|
| $h [cm]$ | = | Steighöhe |
| $\sigma [g \text{ cm}^{-1}]$ | = | Oberflächenspannung aufsteigende Flüssigkeit |
| $\theta [^\circ]$ | = | Randreibungswinkel: Flüssigkeitsspiegel – Kapillarwand |
| $r [cm]$ | = | Radius der Kapillare |
| $\rho [g \text{ cm}^{-3}]$ | = | spezifisches Gewicht der Flüssigkeit |
| $g [10 \text{ m/s}^2]$ | = | Erdbeschleunigung |

Formel 6: kapillare Steighöhe aufsteigender Feuchte

Bei filmbildenden, hydrophobierenden Injektionsmitteln werden die Porenwände im Porengefüge mit einem Hydrophobierungsfilm derart ausgekleidet, dass sich das Wasser dort nicht mehr oder nicht gut anlagern kann. Auf diese Weise wird der Kapillartransport durch die Hydrophobierung behindert oder gestoppt. Der ‚Hydrophobierungsfilm‘ kann rasterelektronenmikroskopisch untersucht und nachgewiesen werden, siehe dazu 9.2. Es können grundsätzlich nur Mauerwerke erfolgreich hydrophobiert werden, bei denen lediglich kapillar aufsteigende Feuchte (=Lastfall Bodenfeuchte) besteht. Bei dem Lastfall drückendes Wasser können Hydrophobierungen nicht wirksam eingesetzt werden. Die durch die Hydrophobierung hervorgerufene Veränderung eines Stoffes drückt sich in der veränderten Eigenschaft (von hydrophil zu hydrophob) aus. Der erzielte Unterschied zwischen Hydrophilie und Hydrophobie wird physikalisch in den in Abbildung 19 aufgeführten Kontaktwinkeln dargestellt. Näheres zu den Kontaktwinkeln wird in 4.34.3.1 erläutert.

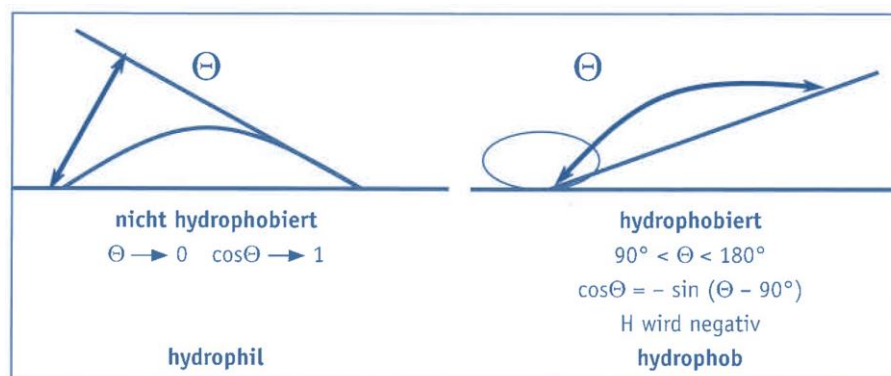


Abbildung 19: Physikalische Darstellung von Hydrophilie und Hydrophobie,

Quelle: Hölzen F.J. / Weber H. Abdichtung von Gebäuden Seite 32 [23]

2.3.5 Anwendungsmöglichkeiten von Injektionsmittel- Bauwerksabdichtungen

Die in dieser Thesis thematisierten hydrophobierenden und porenverengenden Injektionsmittel eignen sich für folgende Abdichtungsaufgaben:

- Herstellung von nachträglichen Querschnittsabdichtungen in kapillaren Mauerwerken
- Einsatz der nachträglichen Abdichtung unter dem Lastfall nicht drückendes Wasser
- Einsatz mittels Bohrlochinjektion, einreihig oder zweireihig
- Einseitiger oder beidseitiger Einsatz ist möglich
- Einsatz als Schleierinjektion ist möglich

Die hydrophobierenden und porenverengenden Injektionsmittel können wie in Abbildung 20 illustriert zum einen drucklos und je nach Herstellervorgabe auch wie in Abbildung 21 dargestellt, unter Druck appliziert werden. Es werden, je nach Hersteller im Fall druckloser Injektionen, Dosierflaschenverfahren, Kartuschenverfahren, oder Saugwinkelverfahren eingesetzt. Das Injektionsmittel gelangt durch Schwerkraft oder kapillares Saugen über die Bohrlöcher in das Mauerwerk hinein. In Abbildung 20 ist ein Dosierflaschenverfahren dargestellt, bei dem der Transportmechanismus die Schwerkraft ist.



Abbildung 20: Drucklose Bohrlochinjektion, Transportmechanismus: Schwerkraft,
Quelle: Frössel F. Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung [7]

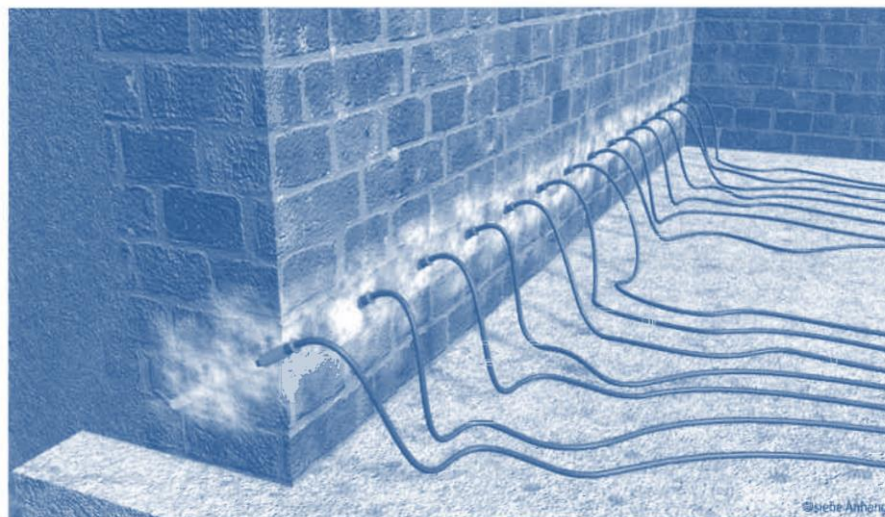


Abbildung 21: Druckinjektion, Transportmechanismus: Pumpendruck,
Quelle: Frössel F. Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung [7]

Bei den Druckverfahren werden Kolbenpumpen im Mittel- oder Niederdruckverfahren eingesetzt. Nicht jedes hydrophobierende und porenverengende Injektionsmittel eignet sich zur Druckinjektion. Diese Möglichkeit wird vom Hersteller explizit angegeben. Die Druckinjektion ist bei hohen Durchfeuchtungsgraden des zu behandelnden Mauerwerks angezeigt, da in solchen Fällen Schwerkraft oder kapillare Saugkraft, auf Grund der Vorbefüllung der Poren mit Wasser, zur Injektionsmittelapplikation nicht ausreichend sind. Zur Druckinjektion werden in der Regel eine Kolbenpumpe, ein Schlauchsystem und Mauerpacker eingesetzt. In Abbildung 21 ist die Druckinjektion systematisch dargestellt.

2.3.5.1 Beschreibung des Bohrlochinjektionsverfahrens zur nachträglichen Mauerwerks-Querschnittsabdichtung

Um das in flüssiger Form vorliegende Injektionsmittel in das Mauerwerk einbringen zu können, ist das Anlegen von Bohrlöchern erforderlich. Diese werden im Mauerwerk gemäß den Herstellervorschriften in einer oder in zwei Bohrlöcherketten angelegt. Die Bohrlöcher sind je nach Injektionsmittel horizontal oder geneigt anzuordnen. Bei schräg angeordneten Bohrlöchern wird das Prinzip des ‚Anbohrens‘ von mindestens 2 Mörtelfugen verfolgt. Bei der horizontalen Applikation wird eine Fuge angebohrt. Es sollen vor allem Fugen mit dem Injektionsmittel getränkt werden. Dennoch breitet sich das Injektionsmittel auch im Ziegel des Mauerwerks aus.

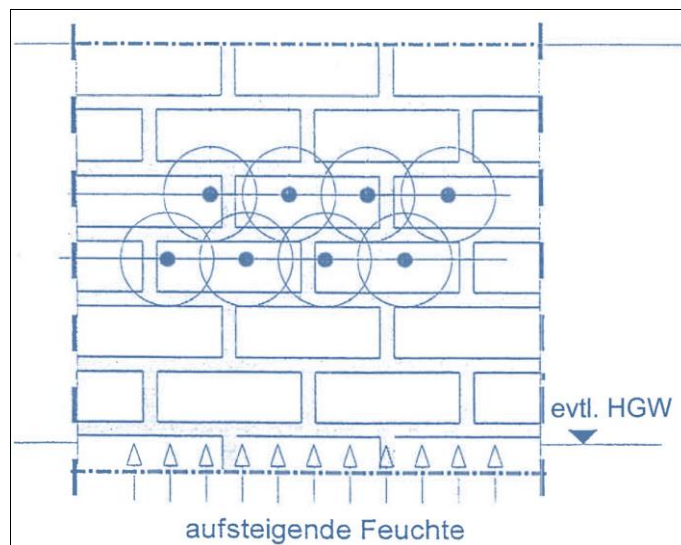


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bohrlöcher und der geplanten Injektionsmittelausbreitung einer zweireihigen Bohrlochinjektion, Quelle: Honsinger D. der Bausachverständige 1./ 2013 [65]

Nachdem sich das Injektionsmittel über die Schwerkraft, Kapillarwirkung oder über den Pumpendruck im Porenraum des Mauerwerks verteilt hat, muss es ausreagieren. Durch das chemische Ausreagieren des Injektionsmittels werden letztendlich physikalische Effekte an den Porenwänden der Kapillarporen gezeitigt. Im Fall hydrophobierender Injektionsmittel werden die Poren des Kapillarraums hydrophob ausgekleidet (Hydrophobierungsfilm) und je nach Zusammensetzung des Injektionsmittels zusätzlich verengt. Auf diese Weise soll der hydrophobierte Bereich des Mauerwerks, der sich, im Idealfall in Zylinderform, radial um den Bohrlochenschaft herum befindet, seine kapillaren Fähigkeiten so weit als möglich verlieren. Hierfür ist es erforderlich, dass die, durch die Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk entstandenen Injektionsbereiche, (=kapillar tatsächlich veränderte Bereiche, im Idealfall in Zylinderform) in der Injektionsebene ineinander verschränkt sind, bzw. überlappt werden. Hierdurch soll im Mauerwerk ein durchgängiger ‚abdichtender Balken‘ geschaffen werden, der die kapillare Feuchtweiterleitung behindert oder im Idealfall stoppen kann. Bei dem hier beschriebenen Verfahren ist die Wirksamkeit der Abdichtung von 3 wesentlichen Faktoren abhängig:

- funktionierendes hydrophobes Auskleiden des wassertransportierenden Kapillarraums (Hydrophobierungsfilm)
- ausreichendes Ausbreitungsmaß des Injektionsmittels im Mauerwerk und damit einhergehend der
- ausreichende Abstand der Bohrlöcher an denen das Injektionsmittel in den Mauerwerk eingebracht wird

In Abbildung 22 ist die Anordnung der Bohrlöcher im Mauerwerk schematisch dargestellt. Im einschlägigen Regelwerk WTA- Merkblatt 4-10-15/D werden Bohrlochabstände von 10 -12,5 cm angegeben. Dort wird auf die Möglichkeit der Anordnung einer 2. Bohrlöcherkette hingewiesen. Deren Bohrlochabstand beträgt jedoch ebenfalls 10 - 12,5 cm. In Tabelle 2 sind die technischen Parameter angegeben, unter denen nach WTA drucklose Injektionen durchgeführt werden sollen.

| Injektionsmittel | Bohrlochabstand nach Verarbeitungsrichtlinie | Bohrungen | Neigung Bohrung | Bohrlochtiefe | Ø Bohrungen |
|---|--|--|------------------|--|-------------|
| WTA 4-10-15/D => keine Unterscheidung der Injektionsmittel bzgl. Bohrlochabstand | 10 – 12,5 cm (Achismaß) | Einseitig bis d=60 cm, bei stärkeren Wänden zweiseitig | Neigung 20 - 45° | Einseitig: Bis zu einer Restwanddicke von 50 mm Zweiseitig: 2/3 der Wanddicke | Ø bis 30 mm |

Tabelle 2: Drucklose Injektion => Wirkmechanismus Schwerkraft / Kapillarität, Quelle: WTA 4-10-15/D [66]

| Injektionsmittel | Bohrlochabstand nach Verarbeitungsrichtlinie | Bohrungen | Neigung Bohrung | Bohrlochtiefe | Ø Bohrungen |
|---|---|-----------|------------------|--|-------------|
| WTA 4-10-15/D => keine Unterscheidung der IM bzgl. Bohrlochabstand | Ein- oder mehr-reihig h= 8 cm 10 – 12,5 cm (Achismaß) Bei zweireihigen Verfahren faktisch doppelter Bohrloch-Abstand in der Horizontalen | Einseitig | Neigung 20 - 45° | Einseitig: Bis zu einer Restwanddicke von 50 mm | Ø bis 30 mm |

Tabelle 3: Druck- Injektion => Wirkmechanismus Pumpendruck, Quelle: WTA 4-10-15/D [66]

Auch bei der Druckinjektion werden im Merkblatt der WTA 10- 12,5 cm Achsabstand einheitlich für alle Injektionsmittel angegeben. Bei der Anordnung von zwei Bohrlochreihen dürfen die Bohrlochabstände verdoppelt werden, was zu einem faktischen Bohrlochabstand von 20 – 25 cm führt. Die technischen Parameter, unter denen nach WTA Druckinjektionen durchgeführt werden sollen, sind in Tabelle 3 angegeben.

2.3.5.2 Wirksamkeit der Abdichtung

Die Wirksamkeit der nachträglichen Injektionsmittelabdichtung ist von der physikalischen Funktion des ausreagierten Injektionsmittels im Mauerwerk und der erzielten Ausbreitung des Injektionsmittels abhängig. Die Wirksamkeit der nachträglichen Abdichtung korrespondiert daher mit dem für die erzielbare Ausbreitung des Injektionsmittels erforderlichen Bohrlochabständen [67]. Anhand der tatsächlich physikalisch kapillar veränderten Mauerwerksbereiche in der Injektionsebene und deren Grad die Feuchtweiterleitung zu behindern, ist die Wirksamkeit der nachträglichen Abdichtung definiert. Hierbei zeigen labormäßige Untersuchungen und Untersuchungen an Objekten, dass die durch Injektionsmittel erzielbare Abdichtung nicht der einer Mauersperrbahn entsprechen kann, wenn der Injektionsmitteleinsatz unter wirtschaftlichen und technisch adäquaten Bedingungen durchgeführt werden soll. Eine derart lediglich graduell wirksame Abdichtung gegen kapillare Feuchte kann in vielen Fällen jedoch durchaus dem gesetzten Abdichtungsziel entsprechen. Es handelt sich daher bei der nachträglichen Injektionsmittelabdichtung um eine graduelle Verbesserung des Feuchtehaushalts eines kapillaren Mauerwerks und nicht zwangsläufig um eine Querschnittsabdichtung (Q-Sperre) im Sinne einer Mauersperrbahn.

Nachträgliche Mauerwerksabdichtungen mittels Injektionen von hydrophobierenden und porenverengenden Injektionsmitteln werden bereits seit geraumer Zeit eingesetzt. Dabei sind Erfolge erzielt worden, welche die grundsätzliche Funktionalität des Systems bestätigen. Vielfach ist jedoch bei der Ausführung von nachträglichen Mauerwerks- Abdichtungen an kapillaren Mauerwerken, mittels Bohrlochketten unter Einsatz von Injektionsmitteln, der Abdichtungserfolg ausgeblieben. Die Bandbreite

des diesbezüglichen Versagens von Injektionsmitteln reicht von partiellen Fehlstellen in dem herzustellenden abdichtenden Balken in Mauerwerkswänden bis hin zum Totalversagen der nachträglichen Injektionsmittel- Abdichtung. Die Schäden in solchen Versagensfällen sind auf Grund der problematischen Nachbesserung immens.

Abdichtungsqualität nach BuFAS [68]

Die Funktionsfähigkeit einer Injektionsmittel-Horizontalabdichtung wird durch folgende Parameter beschrieben:

- Abdichtungsqualität
- Trocknungsfortschritt

Die Abdichtungsqualität einer Injektionsmittel-Horizontalabdichtung wird nach BuFAS mit dem w - Wert (Wasseraufnahmekoeffizient w) überprüft (aus jeder Folge wird der mittlere w -Wert bestimmt), siehe zum w -Wert Formel 10:

- 3 Bohrkerne aus der Injektionsmittelebene
- 6 Bohrkerne aus der Referenzebene

→ A)

Die Abdichtungsqualität AQ wird nach BuFAS wie folgt beurteilt. Es gibt bei der Bestimmung der AQ lediglich zwei Möglichkeiten:

- Für die Abdichtungsqualität $AQ \geq 90\%$ gilt =>Die Abdichtung ist funktionsfähig
- Für die Abdichtungsqualität $AQ \leq 90\%$ gilt =>Die Abdichtung ist nicht funktionsfähig

→ B)

Die Abdichtungsqualität AQ nach BuFAS ist in Formel 7 aufgeführt. Die Berechnung von AQ basiert auf der Berechnung des W - Wertes.

$$AQ = \frac{R_{e,w}}{R_{m,w}} \cdot 100\% = \frac{W_r - W_i}{W_r - 0,5} \cdot 100\%$$

$R_{e,w}$ = Reduzierkoeffizient erreicht

$R_{m,w}$ = Reduzierkoeffizient maximal

AQ [%] = Abdichtungsqualität

W_i [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{\bar{t}}$] = W -Wert Injektionsebene

W_r [$\frac{kg}{m^2} \sqrt{\bar{t}}$] = W -Wert Referenzebene

Formel 7: Abdichtungsqualität, definiert durch BuFAS,

Quelle: BuFAS Ingenieurmerkblatt

Mit Hilfe der Reduzierungskoeffizienten in Formel 8 werden relative Veränderungen ausgedrückt. Es werden 2 Reduzierungskoeffizienten benannt.

- Der erreichte Reduzierungskoeffizient wird (bei Injektionsmittelanwendungen) ausgedrückt durch $R_{e,w}$
- Der maximale Reduzierungskoeffizient $R_{m,w}$ bringt zum Ausdruck, welcher Reduzierungsfaktor maximal erreicht werden muss, um die Grenze des w - Werts mit $w = 0,5 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\bar{t}}$ zu erreichen, siehe Abbildung 35.
- Der maximale Reduzierungsfaktor stellt eine Zielgröße dar, die erreicht werden muss, um erfolgreich eine funktionsfähige Injektionsmittelabdichtung herzustellen.

$$R_{e,w} = \frac{W_r - W_i}{W_i} \quad R_{m,w} = \frac{W_r - 0,5}{W_r}$$

$$R_{e,w} = \text{Reduzierkoeffizient erreicht}$$

$$R_{m,w} = \text{Reduzierkoeffizient maximal}$$

$$W_i \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \sqrt{\bar{t}} \right] = \text{W-Wert Injektionsebene}$$

$$W_r \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \sqrt{\bar{t}} \right] = \text{W-Wert Referenzebene}$$

Formel 8: Reduzierkoeffizienten Abdichtungsqualität,
definiert durch BuFAS, Quelle: BuFAS Ingenieurmerkblatt

2.3.5.3 Grundlegende Fragestellung: Inwieweit verhindert die nachträgliche Abdichtungsebene die kapillare Weiterleitung nach der erfolgten Injektion

Wenn die durch zertifizierte Injektionsmittel erzeugte nachträgliche Abdichtung in kapillaren Mauerwerken versagt, bestehen grundsätzlich die nachfolgend aufgeführten Ursachen:

- Das Mauerwerk besitzt einen für das gewählte Injektionsmittel und/oder das gewählte Verfahren zu hohen Durchfeuchtungsgrad und/ oder zu hohen Versalzungsgrad
- Die Bohrlochabstände sind nicht zutreffend gewählt worden
- Die Ausbreitung des Injektionsmittels ist geometrisch unregelmäßig

Nachfolgend sind skizzenhaft 3 Fälle dargestellt, an denen die grundlegende Fragestellung nach der veränderten Kapillarität in der Injektionsebene erläutert wird. In Abbildung 23 ist erkennbar, dass die Ausbreitung des über die Bohrlochkette eingebrachten Injektionsmittels derart erfolgt ist, dass sich die (hier ideal in Zylinderform dargestellten) in ihrer Kapillarität veränderten Bereiche ausreichend überlappen (ineinandergreifen). In diesem Fall bestehen:

- eine ausreichende Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk und
- ein zutreffender Bohrlochabstand und
- eine ausreichende Ausbreitungsgeometrie

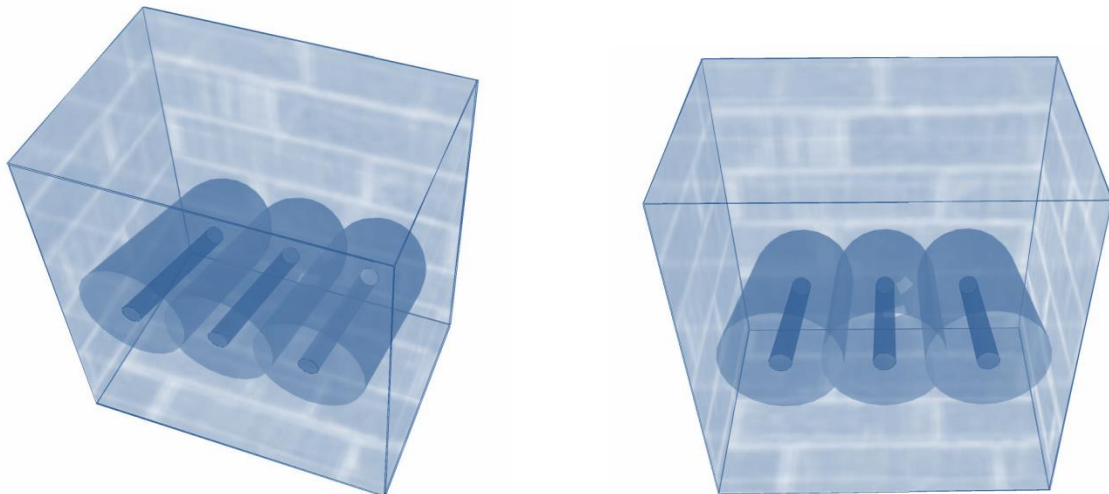


Abbildung 23: Ausbreitungsmaße / Bohrlochabstände ideal:

=> ineinandergreifende zylindrische Injektionsmittel-Ausbreitung, Quelle: Körber, P.

Es entsteht ein ‚abdichtender Balken‘ im Mauerwerk. Die gewünschte Abdichtungsqualität kann erreicht werden.

In Abbildung 24 ist erkennbar, dass die Ausbreitung des über die Bohrlochreihe eingebrachten Injektionsmittels derart erfolgt ist, dass sich die (auch hier ideal in Zylinderform dargestellten) in ihrer Kapillarität veränderten Bereiche nicht ausreichend überlappen. In diesem Fall bestehen:

- eine nicht ausreichende Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk und/oder
- ein nicht zutreffender Bohrlochabstand und/oder
- eine nicht ausreichende Ausbreitungsgeometrie

Es entsteht gemäß Abbildung 24 kein vollständiger, abdichtender Balken im Mauerwerk. Die Abdichtungsqualität, wie in Abbildung 23 kann lediglich graduell erreicht werden. Ursachen für die nicht einheitlich veränderte Kapillarität in der Abdichtungsebene sind hier entweder die zu geringe Ausbreitung des Injektionsmittels selbst und/oder die zu weit gewählten Bohrlochabstände.

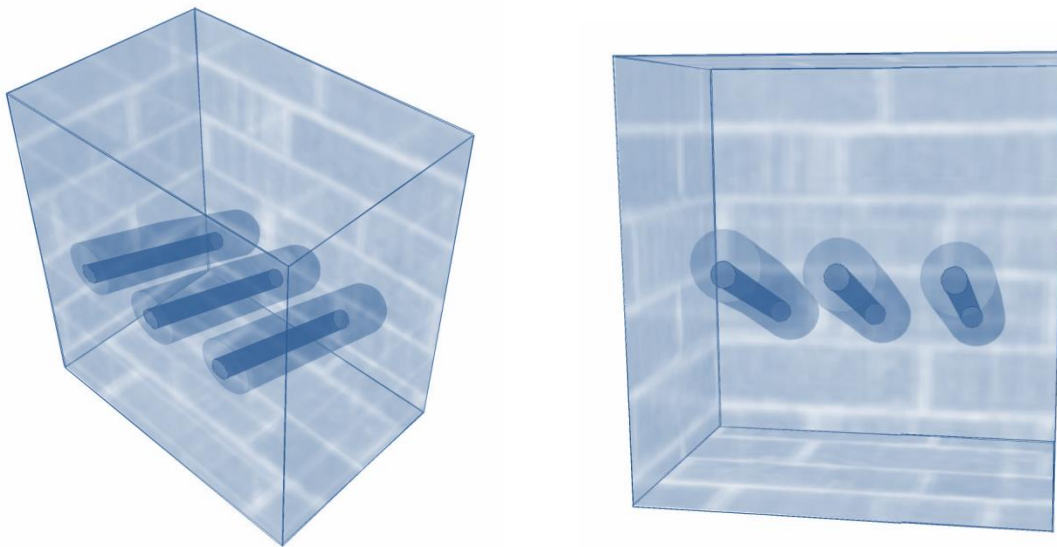


Abbildung 24: Ausbreitungsmaße zu gering / Bohrlochabstände zu weit:
=> zylindrische IM-Ausbreitung, jedoch nicht ineinandergreifend, Quelle: Körber, P.

Tatsächlich wurden jedoch an nachträglich abgedichteten Objekten und ebenso an mit Injektionsmitteln behandelten Proben im Labor vielfach geometrisch deformierte Ausbreitungsmaße festgestellt. Diese sind schematisch in Abbildung 25 dargestellt. In Abbildung 25 ist erkennbar, dass die Ausbreitung des über die Bohrlochreihe eingebrachten Injektionsmittels derart erfolgt ist, dass die in ihrer Kapillarität veränderten Bereiche nicht gleichmäßig und daher geometrisch deformiert sind. Zudem überlappen sich die Bereiche nicht ausreichend. In diesem Fall bestehen:

- eine nicht gleichmäßige und nicht ausreichende Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk und/oder
- ein nicht zutreffender Bohrlochabstand und/oder
- eine geometrisch unbekannte, diffuse, ungleiche Ausbreitungsgeometrie

Es entsteht auch hier (Abbildung 25) kein vollständiger ‚abdichtender Balken‘ im Mauerwerk. Die Abdichtung, wie in Abbildung 23 kann auch hier nur graduell erreicht werden. In den in Abbildung 26 dargestellten Bildern ist das unsymmetrische, geometrisch verformte Ausbreitungsmaß von mit Injektionsmitteln behandelten Ziegeln, die nach erfolgter Injektion im Bereich des Bohrlochs aufgetrennt worden sind, erkennbar. Die hydrophoben Bereiche der Ziegelhälften sind schwarz umrandet. Die übrigen Bereiche der Ziegelhälften sind hydrophil. Die bei Injektionsmitteln häufig anzutreffenden in ihrer Geometrie deformierten Ausbreitungen des Injektionsmittels sind auf Ursachen, die im Material und in der Verarbeitung des Mauerwerks liegen, zurückzuführen.

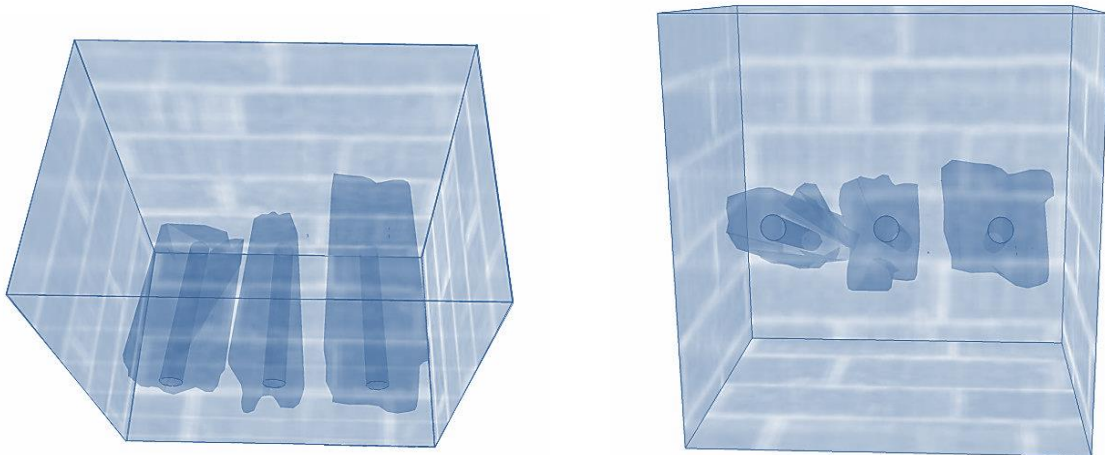


Abbildung 25: Ausbreitungsmaße zu gering / Bohrlochabstände zu weit / Ausbreitung geometrisch deformiert:
=> deformierte IM-Ausbreitung, nicht ineinandergreifend, Quelle: Körber, P.

Dem hier diskutierten Injektionsmitteleinsatz ist die Anwendung bei Altbauten, insbesondere an Denkmälern eigen, da sich solche Verfahren bei neu errichteten Bauwerken nicht durchgesetzt haben. Hier spielen auch die der Injektionsmittelanwendung eigenen Faktoren eine Rolle. Zum einen ist relevant, dass Injektionsmittelanwendungen nur in kapillaren Mauerwerken angewendet werden können. Besteht ein Mauerwerk beispielsweise aus Porenbeton, so ist eine Injektionsmittelanwendung auf Grund des Luftporenanteils in Porenbeton, ausgeschlossen. Zum anderen können Injektionsmittel zur nachträglichen Abdichtung nur bei Mauerwerksfeuchte, sprich bei dem Lastfall ‚Bodenfeuchte‘ eingesetzt werden. Liegt der Lastfall ‚drückendes Wasser vor, ist ein Injektionsmitteleinsatz ausgeschlossen.

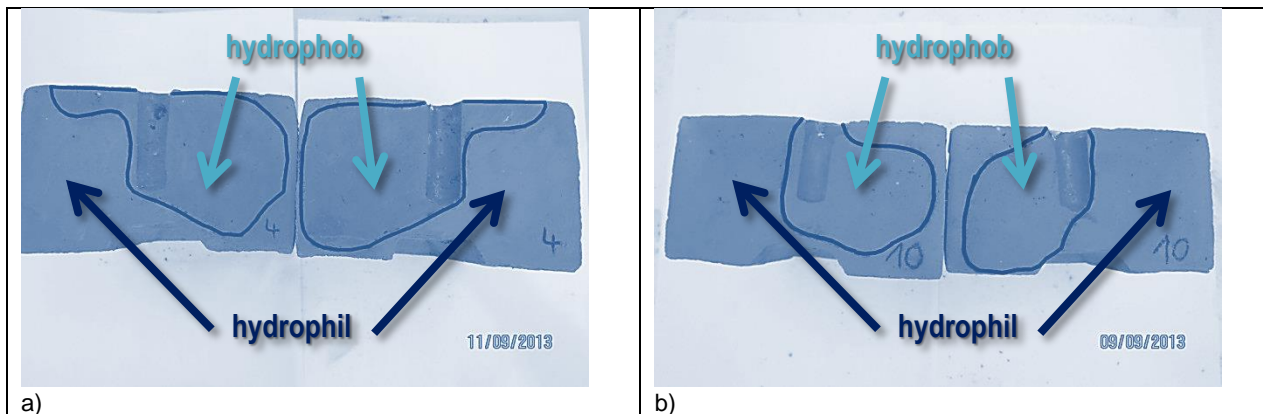


Abbildung 26: a) & b) Ziegel nach Injektionsmittelanwendung mittig aufgetrennt.
Es sind deformierte Ausbreitungs- Geometrien erkennbar, Quelle: Körber, P.

Im Rahmen von Laborversuchen und Versuchen an Objekten wurde festgestellt, dass den deformierten Ausbreitungsgeometrien häufig folgende Ursachen zugrunde liegen:

- Inhomogenitäten der Baustoffe Ziegel / Mörtel
- Risse / Hohlräumigkeit des Mauerwerks
- Unterschiede im Brand bei Ziegeln
- Nicht hydratisierte Bereiche von Mörtelfugen
- Fremdstoffe / Mischmauerwerk
- Durchfeuchtungs- Unterschiede im Mauerwerk

2.3.5.4 Forderungen an ein neues Nachweisverfahren zur Wirksamkeit von Injektionsmittelabdichtungen

Um die Wirksamkeit des Injektionsmittel- Einsatzes an kapillaren Mauerwerken, während der Arbeiten und im Nachgang zu den Injektionsarbeiten, quantitativ und qualitativ nachweisen zu können, bedarf es eines neuen Nachweisverfahrens, mit dem sowohl die in ihrer Kapillarität veränderten Bereiche des Mauerwerks, als auch solche, die unverändert geblieben sind, untersucht werden können. Ein solches Nachweisverfahren muss sowohl die Fragen nach der tatsächlichen geometrischen Ausbreitung des Injektionsmittels, als auch die Fragen nach der Wirksamkeit des Mittels innerhalb der Ausbreitzungszone, beantworten können. Die Anforderungen an die Prüfmatrix eines solchen Nachweisverfahrens müssen folgenden Parametern folgen:

- Die Entnahme von einer Vielzahl von Proben muss möglich sein:
 - Probenentnahme vor Ort an jedwedem Mauerwerksbereich
 - Probenentnahme während der Arbeiten und nach Abschluss der Injektions- Arbeiten
 - Probenauswahl und Probenentnahme aus der Injektionsebene
 - Referenzproben an anderen Mauerwerksbereichen zur Verifikation
 - Geringes Gewicht der einzelnen Proben
 - Geringe Größe der einzelnen Proben
 - Einfache minimalinvasive Probenentnahme
 - Probenentnahme in Messachsen in unterschiedlichen Tiefen des Mauerwerks
- Zur genauen Bestimmung ist eine laborgestützte Nachweismethode erforderlich
- Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse muss gegeben sein
- Die Messergebnisse müssen objektivierbar sein
- Die Messergebnisse müssen differenzierte Aussagen zur Wirksamkeit des Injektionsmittels ermöglichen
- Die Ergebnisse müssen sowohl qualitative, als auch quantitative Aussagen zur Wirksamkeit erlauben
- Die Ergebnisse müssen in kurzen Zeitabschnitten vorliegen

Zum Nachweis der Wirksamkeit der nachträglichen Injektionsmittel- Abdichtung müssen zunächst die Abdichtungsziele formuliert werden. Im Verlauf der Arbeiten sind Überwachungen des Injektionsmitteleinsatzes erforderlich. Schließlich muss nach Durchführung der Injektionsarbeiten das Erreichen der Abdichtungsziele qualifiziert und differenziert nachgewiesen werden.

3. STAND DER TECHNIK – STAND DER WISSENSCHAFT

3.1 Stand der Technik

Das Ertüchtigen, Erhalten und Umnutzen von bestehender Bausubstanz, hat sich im Wandel der Generationen durch Vererbung oder Verkauf von Immobilien im Hinblick auf die Entwicklung der Material- und allgemeinen Herstellungskosten, zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor in der Bauindustrie mit erheblichem Wachstumspotential entwickelt. Zudem besitzt die Erhaltung von kulturhistorisch wichtigen und denkmalpflegerisch interessanten Objekten einen gewichtigen Anteil in der Altbausanierung. Die weiter entwickelten Anforderungen an Bauwerks- Abdichtungen von Gebäuden sollen auch auf Altbauten und Denkmalobjekte übertragen werden. In diesem Sektor können jedoch oft die konventionellen Abdichtungstechniken nicht erfolgreich angewendet werden. Es werden daher vielfach nachträglich einzubauende Querschnittsabdichtungen nachgefragt. In diesem Zusammenhang gewinnt die Planung und Ausführung von nachträglichen Mauerwerksabdichtungen durch den Einsatz von Injektionsmitteln zunehmend an Bedeutung [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77].

Da der Einsatz von Injektionsmitteln zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung lediglich ein Teil einer großen Palette von erforderlichen Sanierungsmaßnahmen ist und vielfach neben anderen Abdichtungsarten eingesetzt werden muss, sind Abklärungen von Schnittstellen und einschlägige Regelwerke für den Injektionsmittel- Einsatz unerlässlich [42]. Der diesbezügliche Injektionsmittel- Einsatz als Bauwerksabdichtung ist in Europa jedoch weder genormt, noch gesetzlich geregelt. Zum Injektionsmitteleinsatz bestehen lediglich nicht normierte Regelwerke und die einschlägige Fachliteratur. Daneben

können Werkberichte und aktuelle Forschungsberichte herangezogen werden. Als einschlägige, nicht genormte und nicht gesetzlich verankerte Regelwerke stehen in Europa die WTA- Merkblätter des Referats 4 zur Verfügung. Die WTA ist explizit wissenschaftlich und an den Bedarfen der Denkmalpflege orientiert. Die Gründung der WTA hatte zum Ziel die Themen/Techniken der Altbausanierung auf wissenschaftliche Erkenntnisse aufzubauen. Die Merkblätter der WTA werden laufend fortgeschrieben. Neben den WTA- Schriften stehen zudem das BuFAS-Merkblatt und die einschlägige Fachliteratur zur Verfügung. In der Fachliteratur wird jedoch der Injektionsmittel- Einsatz zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung nach wie vor überwiegend untergeordnet behandelt [66], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [68], [87]. Nachfolgend wird ein Überblick zum Stand der Technik bezogen auf den Einsatz von Injektionsmitteln zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung gegeben.

3.1.1 Anforderungen an die nachträgliche Abdichtung von Bauwerken durch Injektionsmittel mittels Bohrlochketten

Zur Durchführung von nachträglichen Bauwerksabdichtungen mittels Bohrlochinjektionen werden seitens der Fachregeln und der Fachliteratur Voruntersuchungen gefordert. Im Nachgang zu den Voruntersuchungen am Bauwerk ist unter Berücksichtigung der Nutzung des Objektes ein Abdichtungskonzept zu erstellen. Das Abdichtungskonzept muss zu zusammenhängenden Abdichtungsebenen führen. Ziel ist eine wannenartige Ausbildung der Abdichtung [66], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86].

3.1.2 Nachweis des Abdichtungserfolges bei nachträglichen Querschnittsabdichtungen mittels Injektionsmitteln

Im Nachgang zum Einbau nachträglicher Querschnittsabdichtungen durch Injektionsmittel ist die Wirksamkeit des Injektionsmittels nachzuweisen. [88], [56], [89], [90]. Es bestehen derzeit 4 Verfahren zum Nachweis der Wirksamkeit von nachträglichen Bohrlochinjektionen an kapillaren Mauerwerken:

- [A] Nachweisverfahren an Prüfkörpern oder Bohrkernen, basierend auf dem w- Wert
- [B] Nachweisverfahren an Bohrkernen, basierend auf makroskopischen Kontaktwinkelverfahren
- [C] Langzeit- Feuchtemessungen an Prüfkörpern und Probeinjektion
- [D] Zertifizierungsverfahren nach WTA: Langzeit- Feuchtemessungen / Verdunstungsmessungen an Prüfkörpern oder an Objekten

Alle bisher bekannten und eingesetzten Prüfverfahren bestehen auf dem Erkenntnisgewinn von makroskopischen Untersuchungen [91].

Zu [A]

Im BuFAS Ingenieurmerkblatt [68] wurde ein Prüf-Verfahren für Injektionsmittel vorgestellt, das auf Grundlage einer Langzeit- Forschung an einem Bestands- Mauerwerksobjekt erarbeitet worden ist. Das Prüfverfahren nach BUFAAS basiert auf der W-Wert- Messung

- Erstellung von Prüfkörpern aus Mauerwerk im Labor
- Behandlung der Prüfkörper mit Injektionsmitteln
- Messung der Wassereindringwerte an den Prüfkörpern
- Es handelt sich um ein Laborverfahren.
- Im Rahmen der Veröffentlichung dieses Prüfverfahrens wurde die Abdichtungsqualität AQ definiert

Zu [B]

In Veröffentlichungen [92] wird von einer Prüfmethode berichtet, die in folgenden Maßnahmen besteht:

- Erbohren eines Bohrkerns aus dem Querschnitt des Mauerwerks in der Injektionsebene
- Prüfung der Teile des Bohrkerns vor Ort mittels makroskopischem Tropfenaufsatztest
- Überprüfung, ob die Tropfen stehen bleiben oder kapillar aufgenommen werden

Zu [C]

Das im WTA- Merkblatt 4-10/2015 [66] dargelegte Prüfverfahren basiert auf vergleichenden Feuchtemessungen:

- Probeinjektion in einem repräsentativen Prüffeld, Probenentnahme, Prüfung Injektionsmittel- Verteilung
- Qualitätskontrolle während der Injektion:
 - Überwachung / Protokollierung der planmäßigen Parameter
- Erfolgskontrolle
 - durch vergleichende Feuchtemessungen inkl Referenzmessung
 - Der Erfolg ist gegeben, wenn das Planziel innerhalb von 2 Jahren erreicht ist

Zu [D]

Die im WTA- Merkblatt 4-10/2015 [66] niedergelegte Zertifizierung von Injektionsmitteln basiert auf einem Labor- Messverfahren:

- Überprüfung der prinzipiellen Wirksamkeit des Injektionsmittels bei $D_{(g)}$ 60%, 80% und 95%
 - 1.Messmethode
 - Erstellung von 3 Prüfkörpern (Mauerwerk) im Labor
 - Einstellung der Durchfeuchtungsgrade an den Prüfkörpern
 - Durchführung der Injektionen
 - wasserdampfdichte Beschichtung der Seitenflächen der Prüfkörper
 - Wasserung der Prüfkörper
 - Aufsetzen einer Glocke je Prüfkörper
 - Messung der durch den Prüfkörper diffundierenden Feuchte mittels Silica Gel und Klima Datenlogger
 - Zusätzlich Mikrowellen- Feuchtemessung am Prüfkörper
 - 2.Messmethode
 - Erstellung von 3 Prüfkörpern (Mauerwerk) im Labor
 - Einstellung der Durchfeuchtungsgrade an den Prüfkörpern
 - Durchführung der Injektionen
 - wasserdampfdichte Beschichtung der Seitenflächen der Prüfkörper
 - Wasserung des Prüfkörpers
 - Abdichtung des Wasserbecken
 - Messung des volumetrischen Wasserdurchflusses
 - Die Wirksamkeit des Injektionsmittels soll nach einer Prüfdauer von 60 Tagen gegeben sein, wenn eine Reduktion um 50% erreicht wird
 - Zusätzlich sollen Feuchtemessungen mittels Darr-Prüfungen an unbehandelten Bereichen erfolgen
- Die Identifizierung der Injektionsmittel soll durch IR- Spektroskopie erfolgen

3.1.3 Technische Anforderungen an die Injektionsmittelanwendung

3.1.3.1 Bauwerksdiagnose und Lastfall der Bauwerksabdichtung

[66], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [68], [93]

In der Bauwerksdiagnose sind zunächst die nachfolgend aufgeführten Informationen zu ermitteln:

- Konstruktionsmerkmale
 - Art der Konstruktion und verwendete Baustoffe
 - Art und Anordnung von Bauwerksfugen und Fugenbewegungen (Gesamtverformung)
 - Durchdringungen
 - Geometrie
 - Zugänglichkeit
 - Standsicherheit
 - vorhandene Abdichtungen
- Wasserbelastung
 - Lastfälle der Bauwerksabdichtung
 - chemische Belastung des Wassers
- Schadenerfassung
 - Ort, Art und Umfang von Undichtigkeiten
 - bereits durchgeführte Instandsetzungen
 - Schadensbild mit Folgeschäden
 - Schadensursachen

- Baugrundanalyse
 - Art des Baugrundes in unmittelbarer Bauwerksumgebung (Tiefenprofil)
 - Durchlässigkeit, Kornverteilung, Porengehalt des Bodens
 - vorhandene Schutzschichten alter Abdichtungen
 - Drainage, bestehende Leitungen in Bauwerksumgebung

3.1.3.2 Planung der nachträglichen Bauwerksabdichtung

Grundlage der Planung sind die aus der Bauwerksdiagnose ermittelten Informationen. In der Planung ist das Instandsetzungskonzept vorzugeben [66], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [68]:

- Bauzustand
 - Art der Konstruktion, Zustand, Beanspruchungen, Fugen- und Rissbewegungen
- Baugrundzustand unmittelbar an der Außenseite des abzudichtenden Bauteils
 - Bodenart, Lagerung, Hohlraumgehalt, Durchlässigkeit, Wasserverhältnisse
- Abdichtungsziel (nutzungsabhängig) und Zeitpunkt des Erreichens
 - mögliche Abdichtungsziele können sein:
 - a) Feuchtetransport in flüssiger Form nicht zulässig
 - b) zu definierende Wasserdurchlässigkeit
 - c) Reduktion D(g) um über 50%
- Abdichtungsverfahren
 - flächige oder partielle Injektion innerhalb oder außerhalb des Bauwerkes
- Injektionsmittel
 - Materialbasis, Injektionsmittel mit Eignungsnachweis, Nachweis der Umweltverträglichkeit
- Injektionstechnologie
 - Bohrlochraster, Art der Packer / Lanzen
 - Vorinjektion
 - Reaktionszeit
 - Vorgaben zum Injektionsvorgang
 - Vorgabe und Kontrolle von Verbrauchsmengen
- Standsicherheit
 - während und nach der Abdichtungsmaßnahme
- erforderliche Genehmigungen
 - Injektionen in den Baugrund unterliegen dem WHG (Wasserhaushaltsgesetz) bzw. dem Grundwasserschutzgesetz
 - Genehmigung durch die untere Wasserbehörde sind erforderlich
- flankierende Maßnahmen
 - Trocknung
 - Sanierputzsysteme
- Qualitätssicherung
 - Überwachung
 - Erfolgsnachweis auf der Grundlage des definierten Abdichtungsziels

3.1.3.3 Anforderungen an die Bohrlochinjektion

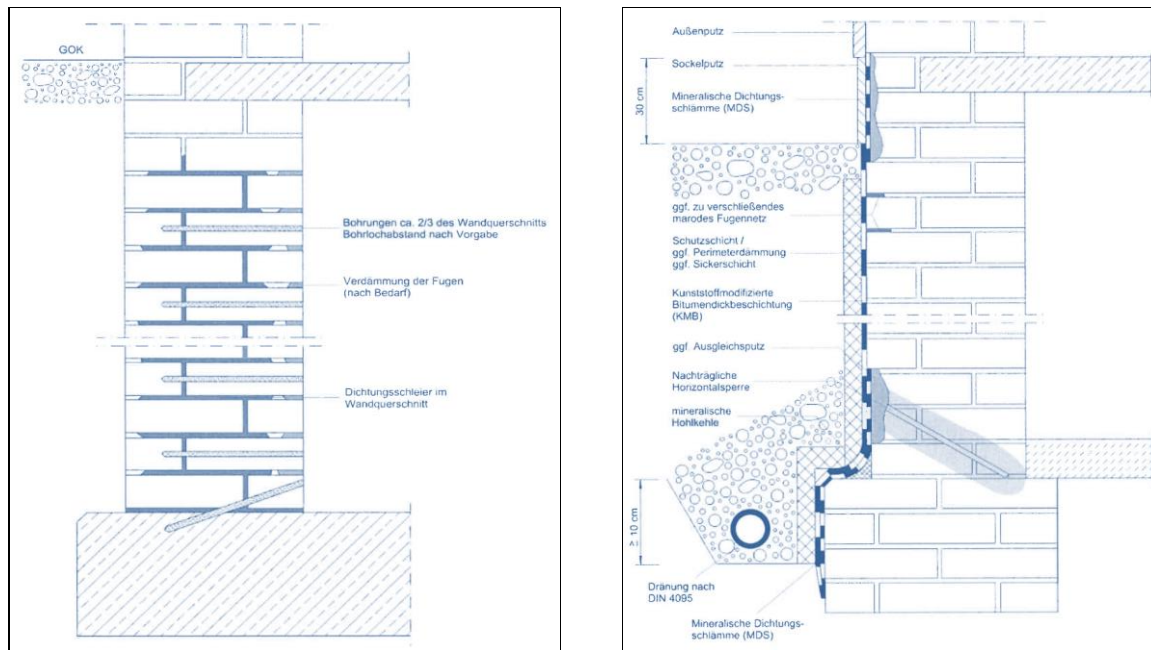
Für das Injektions- Verfahren sind folgende Einsatzbereiche möglich [66], [84]:

- Einsatzbereiche von Injektionsverfahren:
 - Flächige Abdichtungen (Schleierinjektionen)
 - lineare Abdichtungen (vertikal, horizontal)
 - partielle Abdichtungen (Anschlüsse, Durchdringungen, Fugen, usw.).
- Stoffe der Injektionsmittel auf Basis von:
 - Silikate, Siloxane, Silane, Siliconate, Silicone
 - Polyurethane
 - Acrylatgele
 - Kunststofflösungen
 - Methylsiliconate
 - Alkalisilikate
 - Paraffine
 - Kunstharze / Kunstharz- Kautschuk- Produkte
 - Kieselsäureverbindungen

Vorarbeiten

- Falls erforderlich, sind folgende Vorarbeiten durchzuführen:
 - Verdämmen von offenen Fugen, Fehlstellen und bei hohlräumigem Mauerwerk
 - Risse / Hohlstellen in Bohrlöchern schließen
 - Vortrocknung, je nach System
 - allgemeine Schutzmaßnahmen gegen Beschädigungen, da die Injektionsmittel alkalisch sind

Zur Herstellung von Bohrkanälen sollen möglichst erschütterungsarme, auf den Baustoff bzw. das Bauteil abgestimmte Bohrgeräte eingesetzt werden. Injektionen können mit Ein- oder Mehrkomponenten-Injektionsmitteln ausgeführt werden. Als Pumpenaggregate stehen Schnecken-, Kolben-, Membran-, Zahnrad- oder Plungerpumpen bzw. Druckkessel zur Verfügung. Injektionsgeräte müssen mit Druck regulierenden und pulsationsarmen Pumpen ausgerüstet sein. Die Injektionsgeräte müssen auf den Injektionsmittel abgestimmt sein [94]. Injektionsmittel werden über Packer in den Baustoff bzw. das Bauteil eingebracht. Hierbei können Schraub-, Schlag-, Klebe- oder Sonderpacker eingesetzt werden. Verdämmungen können aus mineralischen oder kunstharzgebundenen Stoffen bestehen. Bei der Flächenabdichtung wird die Abdichtungsebene im Bauteil ausgebildet. Der Injektionsdruck ist auf das Bauteil abzustimmen. Je nach Baustoffbeschaffenheit und Porengefüge sind bei Schleierinjektionen rasterartige Bohrungen herzustellen, siehe dazu Abbildung 27.



a)

b)

Abbildung 27: Darstellung einer flächigen Injektion (Schleierinjektion) und einer Injektion zur Herstellung einer nachträglichen Querschnittsabdichtung, Quelle: WTA-Merkblatt 4-6-14 [84]

Für den Abdichtungsvorgang sind mindestens folgende Parameter zu dokumentieren.

- Dokumentation:
 - Feuchtegehalte der Baustoffe
 - Wanddicken
 - Temperaturen (Injektionsmittel, Umgebungstemperatur)
 - Füllgut (Produktname, Hersteller, Chargen-Nr.)
 - Reaktionszeit des Injektionsmittels
 - Injektionsgerät
 - Injektionsdruck
 - Materialverbrauch (je Packer, bzw. je lfdm / m²)
 - Bei Bedarf können Nachinjektionen erforderlich werden.

Nach Abschluss des Injektionsvorgangs müssen die Einfüllstutzen (Packer) entfernt werden. Die verbleibenden Öffnungen sind zu schließen. Anschlüsse und Durchdringungen werden mit partieller Injektion abgedichtet. Vielfach ist es erforderlich, Innenwände, die an abzudichtende Außenwände anschließen, vollständig von den Außenwänden abzutrennen, um eine durchgehende Abdichtungsebene erzielen zu können. Grundsätzlich ist sicherzustellen, dass die vorhandene Bauteilfeuchte nach den Injektionsarbeiten entweichen kann.

Nach Durchführung der Injektionsarbeiten ist ein Wirksamkeits- / Qualitätsnachweis ist zu erbringen

- Die Wirksamkeit des ausgeführten Systems ist nachzuweisen:
 - Erfolgskontrolle
 - Funktionsprüfung
 - Nachweis / Prüfung der Wirksamkeit

Die Ausführung ist durch baubegleitende Kontrollen zu überwachen. Die Abdichtungsmaßnahme ist zu dokumentieren. Hierzu ist ein geeignetes Nachweisverfahren einzusetzen. In Abbildung 27 sind eine nachträgliche Querschnittsabdichtung durch Injektionsmittel und eine Schleierinjektion illustriert.

3.2 Stand der Wissenschaft: Internationale Veröffentlichungen

3.2.1 Environmental SEM and related applications, History of the ESEM and basic design concepts

T.A. Hardt, FEI Company Wilmington USA, Kluwer Academic Publishers, 1999

Thema: Geschichte und Funktionsweise des ESEM [95]

In dieser Veröffentlichung wird auf die Geschichte und die Funktionsweise des ESEM eingegangen. Demnach wurde das erste ESEM-Design bereits Mitte der 1970er Jahre an der University of New South Wales in Australien konzipiert. Der Anfang des ESEM bestand in der Untersuchung von Wollfasern. Das ESEM wurde ursprünglich quasi für diese Untersuchungen entwickelt. Die Forschung an Wollfasern kann auf Grund der Zusammensetzung dieser Fasern nicht im REM durchgeführt werden. Die intensive, professionelle wissenschaftliche Nutzung des ESEM besteht seit 1990. Des Weiteren wird in der Veröffentlichung auf Gas-Elektronen-Wechselwirkungen in Abhängigkeit vom Druck eingegangen.

3.2.2 Topographic contrast of partially wetting water droplets in environmental scanning electron microscopy, N. A. Stelmashenko, J. P. Craven, A. M. Donald, E. M. Terentjev, B. L. Thiel, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Great Britain, Journal of Microscopy, Wiley Online Library, 2001

Thema ESEM: Einfluss von Rückstrahl- / Sekundärelektronen; Einfluss der Oberflächen- Topographie des untersuchten Materials [96]

In dieser Veröffentlichung wird auf die Problematik des Bildrauschens bei sehr kleinen Tröpfchen, durch Kaskadenverstärkung ungewollter Elektronen bei der Anwendung des ESEM eingegangen.

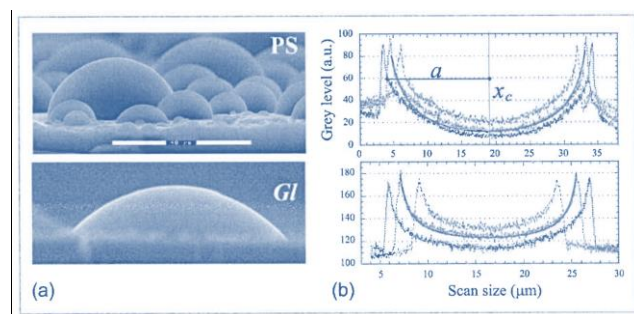


Abbildung 28 : Tropfenkontur erzeugt durch einen Grey Level Scan,

Quelle: N. A. Stelmashenko, J. P. Craven, A. M. Donald, E. M. Terentjev, B. L. Thiel, 2001 [96]

Daneben wird auf den starken topographischen Kontrast von ESEM- Bildern bei Wassertröpfchen mit Größen, die kleiner als die Kapillarlänge sind, hingewiesen. Diese Tropfen besitzen eine Kugelkalottenform. In der Veröffentlichung wird der Kontrast mit einem theoretischen Modell untersucht. Bei ausreichend großen Tropfen, die im Bereich des topographischen Kontrastmodells liegen, können die Kontaktwinkel auf unterschiedlichen Stoffen gemessen werden. Diese im ESEM gemessenen Kontaktwinkel entsprechen unabhängigen, direkten Messungen und auch den Ergebnissen aus der Fachliteratur, so die Autoren. In der Veröffentlichung werden die Möglichkeiten, das ESEM für Kontaktwinkelmessungen nutzen zu können, diskutiert. Es wird darauf hingewiesen, dass das ESEM geeignet ist, an unterschiedlichen Stoffen verschiedene physikalische Eigenschaften zu analysieren. In der Veröffentlichung werden Profile der Tröpfchen aus ESEM-Bildern unter Verwendung einer Analyse-Software und dem Grey Level Scan ausgewertet. Diese Auswertungen sind in Abbildung 28 aufgeführt.

3.2.3 Environmental Scanning Electron Microscopy

G. D. Danilatos, ESEM Research Laboratory, Sydney Australia, 1997

Thema ESEM: Entwicklung, Funktionsweise, Betrieb [97]

In dieser Veröffentlichung wird auf die Entwicklung, die Funktionsweise und den Betrieb des ESEM eingegangen. In der Veröffentlichung wird aufgezeigt, dass Untersuchungen im ESEM bereits etablierte Verfahren sind, bei denen in-situ-Studien an praktisch jeder Art von Oberfläche durchgeführt werden können. Der Vorteil des ESEM besteht darin, dass nasse Proben in ihrem natürlichen Zustand beobachtet werden können. Zudem können trockene Proben unabhängig von ihren elektrischen Eigenschaften untersucht werden. Um das Aufladen der Probe im ESEM zu verhindern, ersetzt das in der Kammer befindliche Gas (Ionisierung) die herkömmliche Beschichtung mit leitfähigem Material. Zudem wird im ESEM das Gas selbst als Nachweismedium genutzt, da die Sekundär- und Rückstreuelektronen in Wechselwirkung mit dem Gas stehen. In der Veröffentlichung wird eine Auflistung der Hilfsausrüstung des ESEM gemacht:

- Temperatursteuerungen (heiße und kalte Stufen)
- Deformationsvorrichtungen für Dehnung, Ermüdung, Vibration, Abrieb usw.
- Mikroinjektoren für die Flüssigkeitsabscheidung und chemische Reaktionen
- Computerisierte Probenpositionierung
- Computergesteuerte Kontrolle der gasförmigen Umgebung.
- Neue Vorbereitungstechniken, um bestimmte Merkmale zu untersuchen
- Neue Präparationstechniken zur Kontrolle oder Verringerung von Bestrahlungseffekten
- spezielle Aktionsvorrichtungen, wie Laserstrahl, Molekularstrahl, Ionenstrahl, Elektronenstrahl, elektrische oder magnetische Mikrovorrichtungen

3.2.4 Dynamic secondary electron contrast effects in liquid systems studied by ESEM

D. J. Stokes, B. L. Thiel, A. M. Donald, Polymers and Colloids Group, Department of Physics, University of Cambridge, Cambridge Great Britain, SCANNING Vol. 22, 2000

Thema ESEM: Signalintensität / Signalqualität, Unterschiedliche Scanraten [98]

In diese Veröffentlichung wird über eine Untersuchung von Wasser-Öl-Emulsionen im ESEM berichtet. Es wird der Sekundär Elektronenkontrast zwischen Öl- und Wasserphasen gezeigt. Es wurde mit der Änderung der Scan-Rate eine Veränderung bis zur Invertierung versuchsshalber herbeigeführt. Die Thematik wird auf die in Flüssigkeiten enthaltenen Ladungsträger, welche eine nur mittlere Mobilität im Vergleich zu denen in metallelektrischen Leitern, sowie feste Isolatoren haben, zurückgeführt. Die Elektronenflussdichte wird über langsamere Scanraten erhöht. Die Themen der Veröffentlichung sind:

- Signalintensität / Signalqualität
- Unterschiedliche Scanraten / Scan-Raten-abhängige Delleneffekte
- Grey Level Scan
- Darstellung / Kontrastvariationen im ESEM
- Aufladungsschäden
- Signalbeeinflussungen
- SE – Emissionsgrad

3.2.5 Electron beam heating effects during environmental scanning electron microscopy - imaging of water condensation on superhydrophobic surfaces, K.Rykaczewski, J.H.J.Scott, A.G. Fedorov, American Institute of Physics, Applied Physics Letters 98, USA, 2011

Thema: Aufheizeffekte im ESEM [99]

In dieser Veröffentlichung wird darauf eingegangen, dass das ESEM die bevorzugte Methode ist, um sich verändernde Tropfen zu beobachten. Bereits vor 80 Jahren wurde dargelegt, dass die Tropfenkondensation eine deutlich höhere Wärmeübertragungsrate als die Dünnschichtkondensation besitzt. Es werden folgende Phänomene, die bei der Untersuchung im ESEM eine Rolle spielen, diskutiert: Strahlungsschäden durch Wasserradiolyse, elektronenstrahl-induzierte Oberflächenbenetzbarkeitsmodifikationen, topographischer Kontrast der dynamischen Flüssigkeitsladung, biologische Probenschäden. In dieser Auflistung fehlt die Verdampfung, da diese nach Meinung der Autoren noch nicht ausreichend untersucht ist. Es handelt sich um die Verdampfung, die beim Kondensieren der Tropfen entsteht. Weiterhin geht die Veröffentlichung auf die Elektronenstrahlenenergie bei der Untersuchung im ESEM ein. So sei basierend auf experimentellen Untersuchungen eine optimale Elektronenstrahlenenergie von 10 keV in Verbindung mit einer geringen Stromstärke für die ESEM- Untersuchungen als guter Kompromiss erfunden worden. Bei diesen Werten wäre eine gute Bildqualität bei geringen Strahlungswärmeeffekten zu erreichen.

3.2.6 Application of the environmental scanning electron microscope to conservation science, E. Doehne and D.C. Stulik, Getty Conservation Institute Los Angeles USA, Scanning Microscopy International USA, 1990

Thema: Materialwissenschaften im Bereich Archäologie, Altertumsforschung und Denkmalpflege unter Verwendung des ESEM [100]

In der Veröffentlichung wird auf die Geschichte und die Anwendung des ESEM, auch im Vergleich mit dem REM eingegangen. Das professionelle wissenschaftliche Arbeiten mit dem ESEM hat in 1990 begonnen. Unter anderem wird das ESEM in letzter Zeit auch für die Archäologie, die Altertumsforschung und Forschung in der Denkmalpflege eingesetzt. In der Veröffentlichung wird auf Untersuchungen an Lehmziegeln eingegangen. Durch das ESEM kann an Lehm das Schwellen und Schrumpfen bei Wasseraufnahme beobachtet werden. Des Weiteren wird in der Veröffentlichung auf ESEM- Untersuchungen an Pergament eingegangen. Im ESEM sind unter anderem Röntgenanalysen, Partikeluntersuchung, Kristallisationsuntersuchungen, Untersuchungen von Ausgasungen und dynamische Prozesse der Aufweitung / Trocknung möglich. Einer der wesentlichen Vorteile des ESEM besteht nach Auffassung der Autoren darin, dass Proben vor der Untersuchung im ESEM nicht zwingend getrocknet werden müssen. Weitere Untersuchungsmethoden im ESEM werden genannt, Untersuchungen: von Korrosionsvorgängen, von Nass-Trocken-Zyklen, von Lösungsmittelwirkung, von Kapillarwirkung, von Infiltrationen, von Salzkristallisation, von Schmelz- und Erstarrungszyklen, von Gefrier- und Auftauzyklen, von Lacktrocknung, von Rissbildung und -vermehrung, von topographischen Veränderungen an Polymeren während der Herstellung. Es wird zudem auf die wichtigsten Unterschiede zwischen Untersuchungen im REM und im ESEM eingegangen.

3.2.7 ESEM development and application in cultural heritage conservation, E. Doehne, Getty Conservation Institute, Los Angeles, USA, 1997

Thema: ESEM in der Denkmalpflege / Altertums- Materialforschung [101]

In dieser Veröffentlichung wird auf Untersuchungen im ESEM in der Denkmalpflege und in der Altertumsforschung eingegangen. Beispiele für diesbezügliche Untersuchungen im ESEM sind Untersuchungen von: Kristallisationsprozessen, Formaldehydkorrosion, Dämpfen, Untersuchungen mit Mikroinjektor, Staub auf Kulturgütern auf dessen Bestandteile; Untersuchungen von Pergament und vieles mehr. In der Veröffentlichung wird auf Beispiele der ESEM- Analyse von den Schriftrollen vom Toten

Meer bis hin zu Untersuchungen an der Sixtinischen Kapelle in Rom eingegangen. Nach dieser Veröffentlichung geht es bei der Erhaltung von Kulturgut um langsame Verschlechterungsprozesse. Hier kann das ESEM als Analysetool eingesetzt werden um Abbauprozesse beobachten zu können. In der Veröffentlichung wird auf die mehrjährigen Erfahrungen an Projekten, bei denen das ESEM eingesetzt wurde, verwiesen. Es wird auf die Unterschiede des ESEM zum REM, sowie auf die Entwicklung des ESEM verwiesen.

3.2.8 Modeling / Optimization of superhydrophobic condensation

N. Miljkovic, R. Enright and E. N. Wang, MIT Cambridge Massachusetts USA, University of Limerick Ireland, Journal of Heat Transfer 135, No. 11, 2013

Thema: Kontaktwinkelmessungen / Tröpfchenkeimung Tropfenwachstum [102]

In dieser Veröffentlichung wird ein einheitliches Modell für die tropfenweise Kondensation auf mikro- / nanostrukturierten superhydrophoben Oberflächen diskutiert. Die Veröffentlichung befasst sich mit mikro- / nanostrukturierten superhydrophoben Oberflächen bei denen die Energieumwandlung von tropfkondensierende Oberflächen untersucht wurde. Es wird auf die Geschichte der Entdeckung und Untersuchung von Tropfenkondensation aus Wasserdampf eingegangen. Weitere Themen der Veröffentlichung sind:

- Kontaktwinkelmessungen
- Tropfenwachstumsmodellierung
- Tröpfchenwärmeübertragung
- Tröpfchengrößenverteilungstheorie

Zudem wird auf folgende Themen der Tröpfchenkeimung eingegangen

- Tröpfchenkeimung an räumlich zufälligen, hochenergetischen Stellen durch direkte Ablagerung von Tröpfchen aus Wasserdampf
- koaleszenzdominiertes Wachstum von Tröpfchen. Hier spielen die Abstände zwischen benachbarte Tröpfchen eine Rolle
- Tröpfchenspringen / koaleszenz-induziertes Tröpfchenspringen
- schwerkraftbasierte Tropfenablösung

3.2.9 Contact angle and wetting properties, Y.Yuan and T.R.Lee, University of Houston USA, G.Bracco and B.Holst (eds), Surface Science Techniques, Springer Verlag, 2013

Thema: Kontaktwinkelmessung und Benetzungsverhalten [103]

In der Veröffentlichung werden unterschiedliche Techniken zur Kontaktwinkelmessung, einschließlich der konventionellen Teleskop-Goniometer-Methode und der Wilhelmy-Balance-Methode, sowie der Tropfenformanalyse vorgestellt. Es werden die verschiedenen Anwendungen und Vorzüge / Beschränkungen der unterschiedlichen Kontaktwinkel- Messmethoden diskutiert. Es wird auf aktuelle Studien zur Kontaktwinkelmessung sehr kleiner Tropfen eingegangen. Zudem werden aktuelle Erkenntnisse zum Benetzungsverhalten und dem Kontaktwinkelphänomen wiedergegeben. Die Ursachen des Benetzungsverhaltens von Wasser werden theoretisch behandelt. Zudem wird intensiv auf aktuelle Kontaktwinkeluntersuchungen im ESEM eingegangen.

3.2.10 Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations

A. Hacqueborda, B. Lubellimb, R. v. Hees, T. Nijlanda, Netherlands, Procedia Chemistry 8, SciVerse ScienceDirect, Elsevier, 2013

Thema: Ausbreitung und Wirksamkeit von Injektionsmitteln in Mörtel und Ziegeln [104]

In dieser Veröffentlichung wird über einen Laborversuch an Ziegeln und Mörtel berichtet, bei dem mit 5 unterschiedlichen Injektionsmitteln an Prüfkörpern gearbeitet wurde. Es sollte zum einen die Ausbreitung und zum anderen die Wirksamkeit der Injektionsmittel im Laborversuch untersucht werden. Die

verwendete Testmethode bestand in unterschiedlichen Graden der Wassersättigung der Proben, die dann miteinander verglichen wurden. Im Ergebnis des Versuchs ist man der Auffassung, dass es möglich ist Injektionsmittel an kapillaren Baustoffen anhand von eher kleinen Proben im Labor zu untersuchen. Im Rahmen des Versuchs wurden deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Injektionsmitteln herausgearbeitet. In der Veröffentlichung wird zudem darauf eingegangen, dass die unterschiedlichen Wirk- und Transportmechanismen der Injektionsmittel bei unterschiedlichen Materialien und deren Durchfeuchtung zu abweichenden Ergebnissen führen, da die unterschiedlichen Porengefüge der Materialien und die unterschiedlichen Durchfeuchtungsgrade bei der Wahl des Injektionsmittels zu beachten wären. Im Rahmen der Versuche sei zudem festgestellt worden, dass ein hoher Wassersättigungsgrad der Baustoffe zu einer geringeren Penetration mit Injektionsmitteln führt, dieses sei besonders signifikant bei Injektionsmitteln mit organischen Stoffen. In den Versuchen wurde zudem festgestellt, dass bei einer sehr hohen Durchfeuchtung eines Probekörpers, Injektionsmittel, welche aus Creme- Produkten bestehen, keine Wirksamkeit mehr zeigten. Die erforderliche Verflüssigung der Creme tritt demnach bei einer sehr hohen Durchfeuchtung nicht mehr ein. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass die Vortrocknung grundsätzlich die Ausbreitung der Injektionsmittel verbessert. Als maßgebend für die Wirksamkeit und Ausbreitung von Injektionsmitteln in kapillaren Baustoffen werden in der Veröffentlichung folgende Faktoren genannt:

- Hohe Salzgehalte
- Inhomogenitäten
- hohe Durchfeuchtungsgrade
- Grenzflächen zwischen Mörtel und Ziegel wegen unterschiedlicher Porengrößen (Grund: Unterschiede des Kapillardrucks)

3.2.11 Removing capillary moisture from brick walls using a drying method and case study, F.Tamas, I.Tuns, University of Brasov Engineering Science, Bulletin University of Brasov Vol. 3, Romania, 2010

Thema: Nachträgliche Q-Sperre mit Injektionsmittel Dryzone [105]

In dieser Veröffentlichung werden Methoden des nachträglichen Einbaus einer Querschnittsabdichtung in kapillaren Mauerwerkswänden diskutiert. Es wird ein Projekt vorgestellt, bei dem ein altes Kirchengebäude (Denkmal) nachträglich mit einer Q-Sperre, unter Anwendung des Injektionsmittels Dryzone (Cremetechnologie), versehen worden ist. In dem Objekt sei an Mauerwerkswänden eine aufsteigende Feuchte mit 1,4 bis 1,6 m Höhe, bei einem Durchfeuchtungsgrad von 35% festgestellt worden. Dryzone sei in Bohrlöcher $\varnothing 12$ alle 12 cm appliziert worden. Im Ergebnis sei eine erfolgreiche und wirksame Injektionsmittelanwendung an den Mauerwerkswänden der Kirche festgestellt worden.

3.2.12 Methods for elimination of dampness in building walls

C. Campiani, M. Pop, Technical University of Cluj Napoca Romania, International Conference on Innovative Research, IOP Publishing, 2016

Thema: Techniken zur Herstellung einer nachträglichen Bauwerksabdichtung [106]

In dieser Veröffentlichung wird auf die nachträgliche Abdichtung von aufsteigender Mauerwerksfeuchte in kapillaren Mauerwerken eingegangen. Es werden verschiedene Verfahren zur nachträglichen Herstellung einer Querschnittsabdichtung in Mauerwerken genannt: Elektro- Osmose, Mauersägeverfahren, Injektionsverfahren. Im weiteren Verlauf wird auf das Verfahren Recon eingegangen. Es handelt sich um ein in Italien entwickeltes Verfahren das darin besteht, Ziegelwände horizontal mittels Sägeverfahren zu durchtrennen, um dann eine spezielle Kunststoffolie, sowie einen vergüteten Mörtel unter Zuhilfenahme von Kunststoffkeilen einfügen zu können. Es werden Denkmalbeispiele zitiert, bei denen Recon erfolgreich angewendet worden ist. In der Veröffentlichung wird der Einsatz von Injektionsmitteln mittels Bohrlochverfahren diskutiert. Es wird Bezug auf der Problematik der Injektionsmittel- Ausbreitung bei hohen Durchfeuchtungen des Mauerwerks genommen. Im Weiteren wird auf die fehlenden Wirksamkeitsnachweise von Injektionsmitteln hingewiesen. Insoweit wird in der Veröffentlichung das Sägeverfahren dem Injektionsmittelverfahren vorgezogen. Des Weiteren werden in der Veröffentlichung

Elektro- Osmose Verfahren diskutiert. Es wird angeführt, dass diese Verfahren praktisch nicht mehr angewendet werden, da ihre Wirkung nicht nachgewiesen ist. Es werden darüber hinaus weitere mechanische Nachrüstverfahren für den nachträglichen Einbau der Q-Sperre diskutiert.

3.2.13 Impact of the chemical injection method on the dispersion of the injected agents in masonry, S. Nenadalova, L. Balik, J. Kolisko, T. Klecka, Czech Technical University Prague, Klokner Institute, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Switzerland, 2013

Thema: nachträgliche Bauwerksabdichtung historischer Gebäude durch Injektionsmittel [107]

In dieser Veröffentlichung wird auf nachträgliche Bauwerksabdichtungen von historischen Gebäuden durch Injektionsmittel eingegangen. Es wird ein Labor- Versuch an Mauerwerks- Prüfkörpern, bei dem Injektionsmittel unter Druck und ohne Druck appliziert wurden, vorgestellt. Ziel des Versuchs war es, die Ausbreitung des Injektionsmittels und die Wirksamkeit / Effektivität des Verfahrens zu beleuchten. Die Effektivität des Verfahrens sollte durch Messung der Wasseraufnahme vor und nach der Injektion überprüft werden. Ferner bestand die Frage, inwieweit Effizienz- Unterschiede zwischen der Druckinjektion und dem drucklosen Verfahren bestehen. Die Laborversuche reflektieren auf das Merkblatt der WTA 4-4-04/D. An den Mauerprüfkörpern wurde nach folgenden Parametern gearbeitet:

- Bohrlöcher \varnothing 20 mm
- Neigung der Bohrlöcher 30°
- Bohrloch- Abstand 12 cm
- Injektionsdruck 2,0 bar

Nach der erfolgten Injektion wurden die Mauerwerks- Prüfkörper in Schichten demontiert und wie folgt gemessen:

- gravimetrische Feuchtemessungen
- Bestimmung der IM Ausbreitung über Wasseraufnahme- Versuche

Im Ergebnis des Versuchs werden in der Veröffentlichung folgende Werte ausgewiesen:

- durchschnittliche Effizienz, Ziegel im Nicht-Druck-Verfahren =>39%
- durchschnittliche Effizienz, Ziegel im Druckverfahren =>88%
- durchschnittliche Effizienz der drucklosen Injektion im Bohrloch =>75%
- durchschnittliche Effizienz der Druckinjektion im Bohrloch =>66%
- durchschnittliche Effizienz der drucklosen Injektion, Abstand 20 - 50 mm =>72%
- durchschnittliche Effizienz der Druckinjektion im Abstand 20 bis 50 mm =>55%

3.2.14 Relevanz der intern. Veröffentlichungen für die hiesige Arbeit

Ein Teil der der Veröffentlichungen befasst sich mit dem ESEM und der Kontaktwinkelmessung. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass das ESEM ein gut untersuchtes, äußerst wichtiges Analysetool geworden ist. Dennoch bestehen für den Einsatz des ESEM kaum Forschungen im Baubereich oder in den bauspezifischen Materialwissenschaften, außer in der Altertumforschung und in Bezug auf Fassaden. An dieser Stelle besteht Nachholbedarf, da im Baubereich durchaus wichtige Anwendungsmöglichkeiten für ESEM- Untersuchungen bestehen. In Bezug auf die Kontaktwinkelmessungen aus der Grenzflächenphysik wird herausgearbeitet, dass auch in diesem Feld umfangreiche Untersuchungen vorliegen, auf denen aufgesetzt werden kann. Dennoch besteht weiterer Bedarf an angewandter Forschung bezüglich weiterer relevanten Mechanismen bei der Kontaktwinkelmessung, um die Genauigkeit der Messungen erhöhen zu können. Für den Baubereich muss zunächst gelten, dass mit der Kontaktwinkelmessung ein hervorragendes Instrument zur Bestimmung von Oberflächen, insbesondere auch von gebrochenen Materialien besteht. Dennoch bestehen derzeit bei Kontaktwinkelmessungen an Baustoffen deutlich höhere Toleranzen als bei anderen Materialien. Diese Toleranzen sollten zukünftig reduziert werden können. In der hiesigen Arbeit liegt die Toleranz der hier gemessenen Kontaktwinkel bei 3°. In den Veröffentlichungen werden die Tropfenbildung selbst und etliche Effekte, die bei der Tropfenbildung relevant sind, diskutiert. Auf diese Forschung kann bei dem hier diskutierten ESEM- Einsatz vielfach aufgesetzt werden. Etliche dieser Effekte fallen jedoch bei der hiesigen Tropfenbildung und – Messung in den Mess-Toleranzbereich und können daher vernachlässigt werden. Auf die in den Veröf-

fentlichungen beschriebenen Beobachtungen zur Tröpfchenentstehung und –Reifung wird in dieser Arbeit aufgesetzt.

Der zweite Teil der Veröffentlichungen / Untersuchungen beschäftigt sich mit nachträglichen Bauwerksabdichtungen und Injektionsverfahren. Es bestehen mehrere Laborversuche zu Injektionsmittelanwendungen im Labor an Prüfkörpern. Im Ergebnis werden differenzierte Messwerte ausgegeben. Daraus geht hervor, dass nach wie vor die möglichen Fehlerquellen bei Injektionsmittelanwendungen bestehen wie: ungleiche Ausbreitung von Injektionsmitteln, zu hohe Durchfeuchtungsgrade des Mauerwerks, zum Teil fragwürdige Wirkmechanismen. Einige Injektionsmittel funktionieren demnach nur bei bestimmten Feuchtegraden des Mauerwerks. Zum Teil versagen demnach Injektionsmittel bei sehr hoher Durchfeuchtung des Mauerwerks vollständig. Hier wird insbesondere auf das Versagen von Cremetechnologie bei hohen Durchfeuchtungen hingewiesen. Es wird ein sehr differenziertes Bild der Injektionsmittelanwendung, bis hin zur Bevorzugung mechanischer Verfahren, gegeben. Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass der Injektionsmitteleinsatz weiter zu erforschen ist, bis zu dem Punkt an dem für jedes der angebotenen Mittel deutlich spezifischere Anwendungsmöglichkeiten belegt werden können, als dies derzeit der Fall ist. Bei nichtvorliegen der nötigen Rahmenbedingungen muss im Einzelfall sogar von dem Injektionsmitteleinsatz abgeraten werden. Zudem besteht in den Veröffentlichungen die Forderung nach einem geeigneten Nachweisverfahren, das schnell durchzuführen ist und mit kleinen Proben auskommt. Es wird konstatiert, dass ein solches geeignetes Verfahren bis jetzt nicht vorliegt. Auf diese Forderung setzt die hiesige Arbeit auf. Es wird hier ein Nachweisverfahren erarbeitet, dass für alle Injektionsmittel gleichermaßen funktioniert.

3.2.15 C.Hecht / T.Steiner: Der Bausachverständige, 2. / 2009 [108]

Thema: Kontaktwinkelmessungen

Die Kontaktwinkelmessung ist nach Auffassung von C.Hecht / T.Steiner für Ingenieure / Bauverständige eine gut einsetzbare Messmethode, da mit wenig Probenmaterial ein schnelles und effektives Ergebnis produziert werden kann. C.Hecht / T.Steiner machen Ausführungen zu Grenzflächenspannung und zu Wechselwirkungen zwischen den Molekülen eines Systems, sowie deren Anziehungskräften in den verschiedenen Phasen und schließlich zur Oberflächenspannung. Es werden Abhängigkeiten zwischen der chemischen Zusammensetzung der Phasen, dem Druck sowie der Temperatur aufgezeigt. Nach Auffassung von C.Hecht / T.Steiner ist die grundsätzliche Unterscheidung der Kontaktwinkel in ‚Winkel $> 90^\circ$ ‘ und ‚Winkel $< 90^\circ$ ‘ lediglich eine getroffene Annahme, die als Definition aufgefasst werden kann. Nach C.Hecht / T.Steiner ist bei der Betrachtung des Kontaktwinkels zu differenzieren in makroskopische und mikroskopische Kontaktwinkel. Während der mikroskopische Kontaktwinkel material-, druck- und temperaturabhängig ist, kommt bei dem makroskopischen Kontaktwinkel zusätzlich die Geometrie der Feststoffoberfläche als Abhängigkeit hinzu. Die Grenze zwischen mikroskopischem und makroskopischem Kontaktwinkel soll nach C.Hecht / T.Steiner bei einer mittleren Rauheit der betrachteten Oberfläche von etwa $0,1 \mu\text{m}$ liegen.

Befindet sich nach C.Hecht / T.Steiner die Phasengrenzlinie flüssig/gasförmig im Gleichgewicht, so handelt es sich um einen statischen Kontaktwinkel, welcher Aufschluss über die Oberflächenenergie des Feststoffs gibt. Hier kann sich der Kontaktwinkel unter dem Versuch in Folge der Zeiteinwirkung durch folgende Parameter etwaig verändern:

- Verdampfen der Tropfenflüssigkeit
- Migration der Tropfenflüssigkeit in das Probematerial
- Anlösen und Aufquellen des Festkörpers durch die Flüssigkeit
- chemische Reaktionen zwischen Festkörper und Flüssigkeit
- Migration oberflächenaktiver Stoffe von der Festkörperoberfläche in die Flüssigkeitsoberfläche

Nach C.Hecht / T.Steiner liegt der Vorteil statischer makroskopischer Kontaktwinkelmessungen darin, dass die Spritzenadel, mit welcher der Tropfen erzeugt wird, während der Messung nicht im Tropfen verbleibt und somit gerade bei kleinen Tropfen eine Verzerrung der Ergebnisse verhindert wird.

Nach C.Hecht / T.Steiner werden als dynamische Kontaktwinkel, Benetzungswinkel dynamischer Prozesse bezeichnet, die beim Messen von Fortschreitwinkeln zur Reduktion des Einflusses von Oberflächen- Rauheiten bestehen. Der Vorteil einer dynamischen Kontaktwinkelmessung besteht nach C.Hecht / T.Steiner in der Vermeidung von Mess-Statistik- Fehlern.

C.Hecht / T.Steiner beschreiben die Kontaktwinkelmessung als ein Verfahren, bei dem Flüssigkeitstrop-

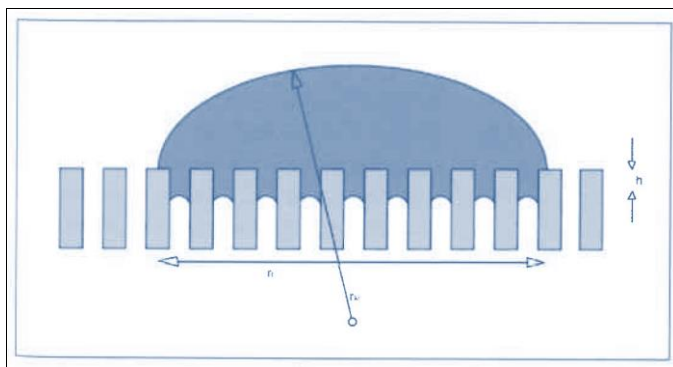
fen auf eine möglichst gerade, ebene und saubere Feststoffoberfläche aufgetragen werden. Es kann auf folgende Arten gemessen werden:

- Ermittlung des Kontaktwinkels an einem statischen Tropfen mit konstantem Volumen. Der Tropfen wird vor der Messung erzeugt.
- Ermittlung des Kontaktwinkels an einem dynamischen Tropfen. Während der Tropfen vergrößert oder verkleinert wird, bildet sich die Grenzfläche ständig neu aus. An wachsenden Tropfen ermittelte Kontaktwinkel werden als Fortschreitwinkel bezeichnet. Bei Tropfenverkleinerung wird von Rückzugswinkeln gesprochen.

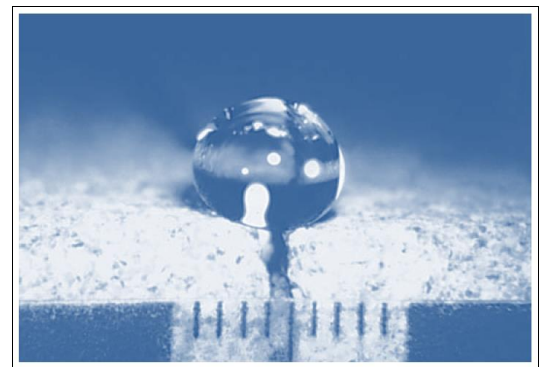
Zur Ermittlung der Kontaktwinkel bestehen nach C.Hecht / T.Steiner die folgenden Verfahren:

- Rechnerisches Verfahren zur Auswertung der Tropfenkontur
- Tangentenverfahren
- Höhen- und Breiten- Verfahren
- Kreissegmentverfahren
- Young Laplace Fitting- Verfahren
- Auswertung der gesamten Tropfenkontur
- Tropfenbild- Verfahren

Nach C.Hecht / T.Steiner hängt die endgültige Tropfenkontur und damit die von einem einzelnen Tropfen bedeckte Feststoffoberfläche sowohl vom mikroskopischen Benetzungswinkel, als auch von der Oberflächenrauheit und der Porosität ab. Der mikroskopische Benetzungswinkel bleibt von makroskopischen Strukturen unbeeinflusst und ist somit unabhängig von der Oberflächengeometrie. Der makroskopische Benetzungswinkel wird gegen die Tangente der makroskopischen Feststoffoberfläche gemessen und ist daher abhängig von der lokalen Neigung der Feststoffoberfläche im Bereich der Dreiphasengrenzlinie. C.Hecht / T.Steiner empfehlen für eine vereinfachte Modellierung anzunehmen, dass die Flüssigkeit in alle im Bereich des maximalen Durchmessers des liegenden Tropfens befindlichen Kapillaren, gleich weit eindringt, Abbildung 29a. Diese Annahme entspricht auch den Aussagen in einer Veröffentlichung von K.Littmann, U.Mengel und U.Herrmann [109]. In der nachfolgenden Abbildung 29b ist ersichtlich, dass ein auf einen hydrophoben Naturstein aufgesetzter Tropfen nicht in den darunter befindlichen Riss eindringt.



a)



b)

Abbildung 29: a) Modell für das Eindringen eines Tropfens in poröser Feststoffmatrix, Quelle: Hecht / Steiner. 2009 [108]

b) Hydrophobierter Naturstein mit Wassertropfen, Quelle: K.Littmann, U.Mengel, U.Herrmann: Hydrophobierungen [109]

Relevanz der Veröffentlichung C.Hecht / T.Steiner für die hiesige Arbeit

Nach C.Hecht/T.Steiner bestehen zunächst 2 Hauptkategorien von Kontaktwinkelmessungen. Zum einen können statische, zum anderen können dynamische Kontaktwinkel (Fortschreitwinkel/Rückzugswinkel) gemessen werden. Dieses trifft auch für die Kontaktwinkel im ESEM zu. Beide Messarten sind bei diesem mikroskopischen Verfahren möglich. Dieses hängt mit den Messbedingungen, die in der Kammer des Mikroskops geschaffen werden zusammen. Um die Betauung zu provozieren werden die Randbedingungen (hier der Kammerdruck) schrittweise verändert. Werden die Randbedingungen im Moment des Tauwasserausfalls konstant gehalten, kann ein statischer Kontaktwinkel gemessen werden. Ist der Betauungsvorgang fortschreitend, können solange dynamische Kontaktwinkel gemessen werden, bis die Tropfen sich vereinigen. Der Kontaktwinkel kurz vor dem Ende der Lebensdauer zeigt die maximale Reife des Tropfens. Dieses kann im ESEM festgehalten werden.

Beide Verfahren wurden in der hiesigen Arbeit verwendet. Zur Veranschaulichung sind in 9.3 Bilder mit fortschreitender Tropfenbildung aufgeführt. Diese Bilder sind im Abstand von 5 Sekunden aufgenommen worden. Es handelt sich bei der Tauwasserbildung im ESEM nicht um, mit einer Pipette aufgesetzte Tropfen, sondern um Proben- Oberflächen, auf denen, auf Grund der Klimabedingungen in der Kammer, viele Tauwassertropfen gleichzeitig gebildet werden. Liegen solche Tropfen dicht beieinander und wachsen die Tropfen weiter an, kommt es zur Vereinigung einzelner Tropfen. Die nun größeren Tropfen wachsen weiter, sofern die Bedingungen dafür gegeben sind. Der gesamte Wachstums- und Vereinigungs- Prozess der Tropfen kann im ESEM verfolgt und über Bildmaterial festgehalten werden. In der hiesigen Arbeit wird auf den Ausführungen dieser Veröffentlichung aufgesetzt und diese werden hier weiterentwickelt. In 9.3.7 wird das hier weiterentwickelte ESEM- Tropfen- Messverfahren vorgestellt. Dieses ist eine Weiterentwicklung der in der Veröffentlichung aufgeführten Tropfenkonturverfahren. Das hier entwickelte Verfahren wird in der hiesigen Arbeit ‚Geometrische Tropfen- Kontur- Analyse‘ genannt.

3.2.16 K.Unterwede/ F.Schmidt-Döhl: Der Bausachverständige 2009 [110]

Thema: Moderne physikalische Methoden bei Bauschadensuntersuchungen

Nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl ist eine genaue Ursachenermittlung eines Schadensfalls im Bau- forschungsbereich meist nur durch die Kombination von unterschiedlichen labormäßigen Analysever- fahren möglich. Es werden die wichtigsten eingesetzten Methoden aufgelistet:

- Rasterelektronenmikroskopie
- Röntgenfluoreszenzspektroskopie
- Röntgendiffraktometrie
- Infrarot-Spektroskopie

Nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl wird das REM hauptsächlich zur Betrachtung von Oberflächenfor- men räumlich strukturierter Objekte eingesetzt. Das erreichbare Auflösungsvermögen ist im Vergleich zum Lichtmikroskop um etwa den Faktor 100 besser. Ein besonderer Vorteil des REM liegt nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl in seiner hohen Tiefenschärfe. Auch bei unebenen Gegenständen, zum Beispiel Bruchproben, bleibt das Bild scharf. Da das REM anstelle von Licht mit Elektronen zur Bilder- zeugung arbeitet, können die Topographie der Oberfläche und die Spektren (chemische Zusammenset- zung der Probenoberfläche) verarbeitet werden. Weil sich die Probe durch die Absorption der Elektro- nen bzw. durch die Abgabe von Sekundärelektronen aufladen kann, ist das Rasterelektronenmikroskop in der Regel nur für leitfähige Proben benutzbar. Nichtleitende Proben können jedoch durch Aufdamp- fen einer dünnen leitfähigen Schicht (Gold) auch für den Einsatz im Rasterelektronenmikroskop präpa- riert werden. Die Rasterelektronenmikroskopie wird nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl im Baubereich überwiegend bei folgenden Anforderungen verwendet:

- Kombination von Informationen zur Morphologie und zur chemischen Zusammensetzung
- Kombination von Informationen bezüglich des Gefüges und der Kristallorientierungen
- Anwendungsmöglichkeiten bestehen bei der Analyse von Partikeln und Ausscheidungen
- Analyse von Werkstoff- Inhomogenitäten und Oberflächenbelägen

Der Einsatz moderner physikalischer Methoden zur Bauschadensanalyse ist nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl aus modernen Laboratorien nicht mehr wegzudenken. Hierbei spielen nach Auffassung von nach K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Analysen eine wichtige Rolle. Des Weiteren sind eine einfachen Probenvorbereitung, und der Einsatz von geringen Material- mengen die für die Analyse wichtig.

Relevanz der Veröffentlichung K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl für die hiesige Arbeit

Wie von K.Unterwede / F.Schmidt-Döhl angesprochen, spielen Schnelligkeit und Zuverlässigkeit auch bei dem Nachweis der Wirksamkeit von, durch Injektionsmittel in ihrer Kapillarität veränderten Baustof- fen eine große Rolle, wenn das Verfahren baupraktischen Nutzen bringen soll. Zudem sind eine einfa- che Probenvorbereitung und der Einsatz von geringen Materialmengen erforderlich. Die Vorteile der hier vorgestellten ESEM- Nachweismethode bestehen in folgenden Parametern:

- Es können sehr geringe Probenmengen verwendet werden. Diese Proben sind leicht zu transportieren
- Die Untersuchungen im ESEM können schnell durchgeführt werden
- Die Untersuchungen lassen eine hohe Genauigkeit zu
- Die Ergebnisse der ESEM- Untersuchungen sind reproduzierbar und objektivierbar

3.2.17 H.Weber: ARCONIS 1 / 2002 [111]

Thema: Entfeuchtung und Trockenlegung von Mauerwerk

H.Weber beschreibt den Einsatz von Injektionsmitteln zur nachträglichen Bauwerksabdichtung. Es soll dabei nach H.Weber eine durchgängige Sperrschicht erreicht werden. Die unterschiedlichen Wirkprinzipien von diesbezüglichen Injektionsmitteln beschreibt H.Weber wie folgt:

- [A] Im Kapillarsystem lagern sich die Wirkstoffe ab und verdichten dieses, so dass ein Porensystem mit geringeren Kapillarradien entsteht. Im Extremfall werden die Kapillaren völlig mit dem Wirkstoff gefüllt
- [B] Die Wirkstoffe lagern sich im Kapillarsystem ab und hydrophobieren die Kapillarwände - So entsteht eine nicht benetzbare Schicht, die keine Kapillarität mehr aufweist
- [C] Die beiden Wirkprinzipien: kapillare Verdichtung / Hydrophobierung werden in Kombination angewendet.

Nach H.Weber sind bei der Durchführung einer Injektion zur Mauerwerksabdichtung im Vorfeld unter anderem einige grundsätzliche Fragen zu klären:

- Besteht eine Hohlräumigkeit des Mauerwerks?
- Welcher kapillare Durchfeuchtungsgrad liegt vor?
- Wie ist der Unterschied zwischen dem vorhandenen Gesamtporenvolumen und dem scheinbaren Porenvolumen eines Baustoffs?

Nach H.Weber bestehen bei Injektionsmittelanwendungen die nachfolgenden Unsicherheitsfaktoren:

- Bohrlochabstand
- Inhomogenität und Hohlräumigkeit des Mauerwerks
- Kapillare Durchfeuchtung oder kapillarer Durchfeuchtungsgrad
- Verteilung des Injektionsmittels im Kapillarraum
- Entwicklung des Wirkprinzips, also Aufbau der Hydrophobie

Relevanz der Veröffentlichung auf die hiesige Arbeit

Gerade die nach H.Weber bei Injektionsmittelanwendungen bestehenden Unsicherheitsfaktoren hinsichtlich Bohrlochabstand, Inhomogenitäten, Hohlräumigkeit, kapillarem Durchfeuchtungsgrad, Verteilung des Injektionsmittels im Kapillarraum und die Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk machen auch hier den Bedarf nach einem geeigneten Nachweisverfahren deutlich. Es wird deutlich, dass ein solches Verfahren auch Aussagen zur geometrischen Verteilung des Injektionsmittels im Mauerwerk aufzeigen muss.

3.2.18 H.Weber: Der Bausachverständige 6 / 2005 [112]

Thema: Bauphysikalische und chemische Anforderungen an Hydrophobierungsmittel

Nach H.Weber sind die wichtigsten physikalischen Anforderungen an Hydrophobierungen

- die Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme
- die Erhaltung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Leistungsfähigkeit der kapillaren Wasseraufnahme wird nach H.Weber im Wesentlichen bestimmt durch den Kapillarradius der Poren des Baustoffs:

- [A] Mikro- und Gelporen sind zu klein für den kapillaren Transport
- [B] Makro- oder Kapillarporen sind in der Lage, Wasser / andere Flüssigkeiten im Baustoff zu transportieren
- [C] Luftporen sind für den kapillaren Wassertransport ungeeignet

Die kapillare Wasseraufnahme von mineralischen Baustoffen gehorcht nach H.Weber in den meisten Fällen dem Wurzel-Zeit Gesetz. Der Wasseraufnahmekoeffizient w beschreibt im eigentlichen Sinne die kapillare Sauggeschwindigkeit eines Baustoffs, wird häufig aber generell als Maß für die kapillare Saugfähigkeit von Baustoffen verwendet. Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten ist genormt. Nach H. Weber bestehen aus physikalisch-chemischen und ökologischen Gesichtspunkten folgende Anforderungen an Injektionsmittel:

- Schutzfunktion gegen schadensrelevante Einflüsse, in erster Linie gegen Wasseraufnahme
- Keine merkliche Reduktion der Trocknungseigenschaften von Baustoffen
- Hohe Haltbarkeit / Keine bauschädlichen Nebenprodukte
- Leichte Applizierbarkeit / Hohe Wirtschaftlichkeit
- Günstiges Reversibilitätsverhalten
- Lösemittelfrei oder lösemittelarm, wasserverdünnbar
- Verpackungsfreundlich

Nach H.Weber ist die Qualität einer hydrophobierenden Imprägnierung immer von verschiedenen Faktoren abhängig und muss überprüft werden:

- Qualität des Imprägniermittels
- Applikation und Applikationsverfahren
- Aufbringmenge
- Erzielte Eindringtiefe

Je höher die Aufbringmenge auf einem porösen Baustoff, desto höher die Eindringtiefe, desto länger und nachhaltiger die Schutzwirkung. Dabei ist zur Erzielung einer optimalen Eindringtiefe die Verweil- oder Kontaktzeit zwischen dem Injektionsmittel und dem Baustoff von größter Wichtigkeit.

Relevanz der Veröffentlichung für die hiesige Arbeit

Um die mikroskopischen Messungen korrelieren zu können, wurden in der hiesigen Arbeit makroskopische Messungen nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz (w -Werte) angestellt. In einem zukünftigen Schritt ist der Aufbau einer Datenbank angezeigt, bei der die w -Werte und die fiktiven Wassergehalte für die unterschiedlichen Injektionsmittel bei unterschiedlichen Durchfeuchtungsgraden an Normmauerwerk gemessen werden. Ein solches Verfahren wurde in dieser Arbeit bereits exemplarisch angewandt. Anhand der makroskopisch gewonnenen Daten können den ESEM- Kontaktwinkel spezifische w -Werte zugewiesen werden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit eine Feuchtesimulation für das untersuchte Mauerwerk anzustellen. Der w -Wert hat in der hiesigen Arbeit, als gut untersuchte und praxistaugliche Untersuchungsgröße, einen integralen Stellenwert im Nachweisverfahren. Das Wissen über den w -Wert, seine Anwendung und seine Eignung die Saugfähigkeit eines Stoffes zu beschreiben, haben einen hohen Bekanntheitsgrad in der Fachwelt. Zudem ist die w -Wert- Messung in Europa genormt. Aus diesen Gründen wurde das hier entwickelte Nachweisverfahren auf der makroskopischen w -Wert- Bestimmung aufgebaut. Neben den von H. Weber genannten Faktoren, welche die Qualität von Injektionen beeinflussen, müssen noch angefügt werden:

- Risse
- Hohlräumigkeit des Mauerwerks
- Anomalien der Materialien
- Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk

3.2.19 D. Honsinger, Der Bausachverständige, 1 / 2013 [65]

Thema: Nachträgliche Abdichtung gegen aufsteigend Feuchte im Mauerwerk

Nach Auffassung von D.Honsinger handelt es sich bei nachträglichen Bauwerksabdichtungen um eine der am häufigsten durchgeführten Baumaßnahmen an Bestandsbauten. Die Anwendung von nachträglichen Bauwerksabdichtungen sei nicht genormt. Allein die WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) habe diesbezüglich Regelwerke erarbeitet und weitergeführt. Die Anwendung der WTA-Merkblätter sei nach D. Honsinger jedoch freiwillig. WTA-Merkblätter würden spätestens alle fünf Jahre auf Aktualität überprüft. D. Honsinger fordert für den Injektionsmitteleinsatz neben der lückenlosen Bauüberwachung nach einer abzustimmenden Frist und nach Abschluss der baulichen Durchführung, eine kritische Qualitätskontrolle am Bauwerk durchzuführen. Für diese Qualitätskontrolle sind nach D. Honsinger folgende Maßnahmen erforderlich

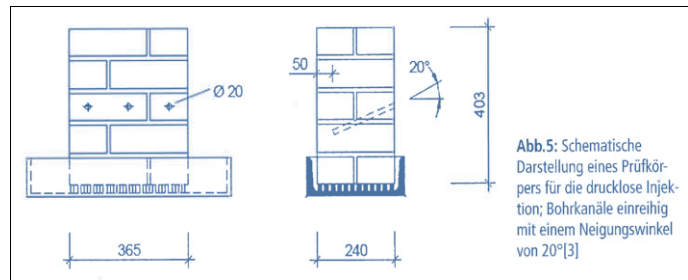
- Voruntersuchungen im Vorfeld
- präzisierte Sanierungsziele
- im Rahmen der Voruntersuchungen / Fachplanung sind festgestellte Verfahrensparameter heranzuziehen

Im Zentrum der Qualitätskontrolle stehen nach Auffassung von D. Honsinger vergleichende Feuchtemessungen. Dabei soll die Trocknung des Mauerwerks oberhalb der Abdichtungsebene objektiv festgestellt werden. Der Erfolg aller durchgeführten Maßnahmen sei nach D.Honsinger dann gegeben, wenn die Planungsziele im vorgegebenen Zeitraum erreicht worden sind. Wenn nicht anders vereinbart, sollte nach D. Honsinger ein Zeitraum von zwei Jahren zur Überprüfung gelten. D. Honsinger beschreibt zudem die Zertifizierung und Fremdüberwachung von Injektionsmitteln. Demnach dürfen nach WTA nur Injektionsmittel verwendet werden, die den Nachweis der prinzipiellen Eignung aufgrund von standardisierten Wirksamkeitsprüfungen erbracht haben. Die Art des Eignungsnachweises wird im WTA-Merkblatt 4-10 unter Nennung der Prüfkriterien geregelt. Der Eignungsnachweis bzw. die Zertifizierung kann für unterschiedliche Mauerwerksfeuchtebelastungen ($D_{(g)}$: 60%, 80%, 95% +/- 5%) erbracht werden, so dass prinzipielle Anwendungsmöglichkeiten und -Grenzen abgeleitet werden können. Der Prüf-ablauf ist in Abbildung 30 erläutert.

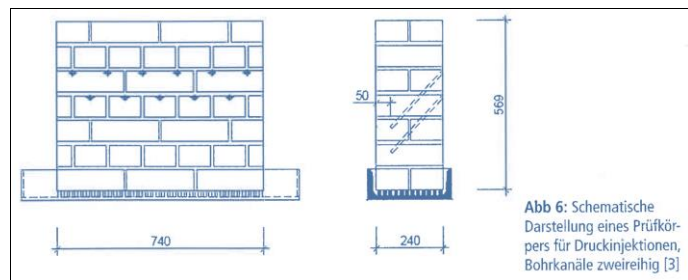
Tabelle 3: Zusammenfassung des Prüfablaufs [3]

| | DFG 60 | DFG 80 | DFG 95 |
|---------------------------------|---|---|--------|
| Prüfkörperherstellung | Herstellung der Klein- oder Großprüfkörper entsprechend den Vorgaben für Ziegel, Mörtel und Abmessungen nach Abs. 7.1.1 | | |
| Konditionierung | Lagerung der Prüfkörper über einen Zeitraum von mindestens 28 Tagen bei konstantem Raumklima | | |
| Einstellung Durchfeuchtungsgrad | Prüfkörper bei $T = 60^{\circ}\text{C}$ bis zur Massekonstanz trocknen und anschließend bis zur Sättigung im Wasser lagern | Nach Erreichen der Sättigung | |
| | Prüfkörper bis zur Massekonstanz trocknen, mit der errechneten Wassermenge für DFG 60 bzw. DFG 80 allseitig befeuchten oder die gesättigten Prüfkörper bis zum vorgesehenen DFG trocknen. Nach Erreichen der Zielmasse Prüfkörper wasserdampfdicht umhüllen und 28 bis 56 Tage lagern | Prüfkörper 28 bis 56 Tage bzw. bis zur Injektion luftdicht umhüllen | |
| Injektion | Injektion von zwei Prüfkörpern gemäß zu protokollierender Herstellervorgaben bezüglich Vorbehandlung, Injektion, Mengen etc. | | |
| Lagerung nach der Injektion | Alle Prüfkörper erhalten unmittelbar nach der Injektion an den Seitenflächen und der Rückseitenfläche (die Injektionsseite bleibt offen) eine wasserdampfdichte Beschichtung oder Folie | | |
| | Alle Prüfkörper verbleiben über einen Zeitraum von maximal 28 Tagen im Raumklima, ohne dass die untere Ziegelschicht im Wasser steht. | Referenz- und Injektionsprüfkörper stehen für maximal 28 Tage mit der unteren Ziegelschicht im Wasser | |
| Wirksamkeitsprüfung | Luftdichte Umhüllung der bislang offenen Injektionsseite - alle Prüfkörper stehen mit der unteren Ziegelschicht im Wasser und Beginn der Wirksamkeitsprüfung entsprechend den in Abs. 7.1.5 genannten Verfahren | | |

a)



b)



c)

Abbildung 30: a) Zusammenstellung des Prüfablaufs b) Prüfkörper drucklose Injektion

c) Prüfkörper Druckinjektion, Quelle: WTA 4-10, 2015 [66]

Auf Antrag wird nach D.Honsinger die WTA- Dienstleistungsmarke solchen Injektionsmitteln zuerkannt, welche die in dem WTA-Merkblatt 4-10 genannten Anforderungen erfüllen.

Relevanz der Veröffentlichung für die hiesige Arbeit

Es ist zutreffend, dass bei Injektionsmittelanwendungen eine Qualitätsüberprüfung erforderlich ist. Diese muss an den zuvor anhand der Mauerwerksdiagnostik definierten Sanierungszielen / Abdichtungszielen orientiert werden. Die von D.Honsinger geforderten und dargelegten Prüfvorgänge (diese entsprechen dem WTA- Merkblatt 4-10-15) besitzen jedoch folgende gravierende Nachteile:

- Es handelt sich um Langzeit-Verfahren (vergleichende Messungen) => 2 Jahre
- Die Prüfkörpererstellung ist sehr aufwendig und nicht baupraktisch
- Das Zertifizierungsverfahren macht lediglich grundsätzliche Aussagen zur Wirksamkeit der getesteten Injektionsmittel; Es werden jedoch keine Aussagen zur tatsächlichen Wirksamkeit der Injektionsmittelanwendung vor Ort (am Objekt) getroffen. Daher besteht trotz Zertifizierung nach WTA etwaig die Gefahr, dass ein Injektionsmittel vor Ort nicht den gewünschten Abdichtungserfolg liefert. Dieser Umstand kann mit den von Honsinger beschriebenen Nachweisverfahren nicht testiert werden.

Das von D. Honsinger angesprochene Zertifizierungsverfahren nach WTA eignet sich für die Zertifizierung von Injektionsmitteln und kann die grundsätzliche Wirksamkeit eines Injektionsmittels aufzeigen. Dieses Verfahren eignet sich jedoch nicht für den baupraktischen Einsatz und kann nicht als Nachweisverfahren im Sinne der hiesigen Arbeit gelten. Die Zertifizierung von Injektionsmitteln ist ein Vorgang der von den Herstellern erwirkt wird, welche nach Verleihung des Zertifikats ihre Injektionsprodukte mit dem WTA- Zertifikat anbieten dürfen. Es ist damit zwar die generelle Wirksamkeit des Injektionsmittels in einem quasi-normierten Verfahren nachgewiesen. Die tatsächliche Eignung der Injektionsmittelanwendung, die fachgerechte Anwendung des Injektionsmittels, sowie das tatsächliche Erreichen der Abdichtungsziele an einem Objekt, können mit dieser Zertifizierung jedoch nicht nachgewiesen werden. Es bedarf eines Nachweisverfahrens, welches das Erreichen der tatsächlichen Abdichtungsziele quantitativ und qualitativ belegen kann. Das neue hier vorgestellte Messverfahren bietet mehr Möglichkeiten als das in der Zertifizierung verwendete Messverfahren, da auch die Geometrie der durch die Injektion veränderten Kapillarität im Mauerwerk erfasst werden kann. Zur Qualitätsüberprüfung des Injektionsmitteleinsatzes bietet das hier vorgestellte mikroskopische Verfahren deutliche Vorzüge:

- Geringe Probenmengen bei einer kurzfristigen, schnellen Testierung sind möglich
- Proben können über weite Strecken transportiert (versendet) werden
- Es werden konkrete Proben vom abzudichtenden Objekt untersucht

3.2.20 Remmers- Akademie: Reihe Gebäudeinstandsetzung

Gebäudeinstandsetzung Remmers- Akademie 2003 [113] und 2004 [114]

Die Injektionstechnologie zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung wird bereits seit über 40 angewandt. Die ersten Forschungen zur Untersuchung von Injektionsmitteln führte die deutsche Bundesanstalt für Materialprüfung vor 40 Jahren (Forschungsbericht 1510) über eine Versuchsdauer von 2 Jahren an Standardmusterwänden aus saugfähigen Ziegeln mit Kalkmörtel durch.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Anwendung von Injektionstechnologie an Mauerwerken ein Verfahren ist, bei dem mit oder ohne Druck, Poren (Hohlräume) eines Baustoffs oder Mauerwerks mit dem Injektionsmittel getränkt werden. Das Mauerwerk kann jedoch Risse, Fehlstellen besitzen, die ebenfalls, wie Poren und Kapillaren, mit dem Injektionsmittel beaufschlagt werden. Es wird unterscheiden zwischen dem Gesamtporenvolumen und dem scheinbaren Porenvolumen. Während das Gesamtporenvolumen das Volumen aller Poren umfasst, geht es bei dem scheinbaren Porenvolumen nur um die Kapillarporen. Die Ermittlung des Gesamtporenvolumens erfolgt unter Einsatz von Druck mit der Quecksilberdruckporosimetrie. Das scheinbare Porenvolumen kann hingegen durch Messung der kapillaren Wasseraufnahme bestimmt werden. In analoger Weise wird auch die Durchfeuchtung unterschieden:

- $D_{(g)kap}$ => Durchfeuchtungsgrad kapillar
=> hier bezieht man den Feuchtegehalt auf die kapillare Sättigung (=scheinbares Porenvolumen)
- $D_{(g)ges}$ => Durchfeuchtungsgrad gesamt
=> hier bezieht man den Feuchtegehalt auf die Sättigungsfeuchte (=gesamtes Porenvolumen).

Die Injektionsmittel, die bei einer Injektion eingebracht werden lagern sich im Kapillarsystem des Mauerwerks an:

- Die Wirkstoffe lagern sich im Kapillarsystem ab und hydrophobieren die Wandungen der Kapillarporen. Bei filmbildenden Mitteln entsteht auf den Kapillarporenwandungen eine wasserabweisende Schicht:
=> Wasser kann sich nicht mehr anlagern
- Bei kombinierten Produkten werden zusätzlich die Poren verengt

Nach den Ausführungen des Berichtes wird die hydrophobierende Wirkung durch eine Veränderung des Benetzungswinkels (=Kontaktwinkels) nachgewiesen. Sofern dieser über $> 90^\circ$ ist, verlieren die Kapillaren ihre Saugfähigkeit. Es handelt sich um eine makroskopische Nachweismethode, die vor Ort an einem aus der betreffenden Wand gezogenen Bohrkern vollzogen wird.

Gebäudeinstandsetzung Remmers- Akademie 2005 [115]

Es wird ein Wirksamkeitsnachweis von Injektionsmitteln veröffentlicht.

Dieser Wirksamkeitsnachweis wurde am Kombinationsprodukt Aida Kiesol durchgeführt. Der Nachweis ist mit dem Prüfzeugnis 2/179952 des BAM belegt. Es wurden an 2 Prüfwänden im Labor (unbehandelt und behandelt) die Wassergehalte im Wasserbad gemessen. Der Trocknungseffekt an der mit der Injektion versehenen Wand konnte belegt werden. Zudem wurde die Wirksamkeit des Kombinationsproduktes Kiesol gemäß TÜV-Bericht BB6/7107-00 zertifiziert, indem an mit dem Injektionsmittel behandelten und unbehandelten Prüfkörpern aus Mauerwerk Verdunstungsmessungen durchgeführt wurden.

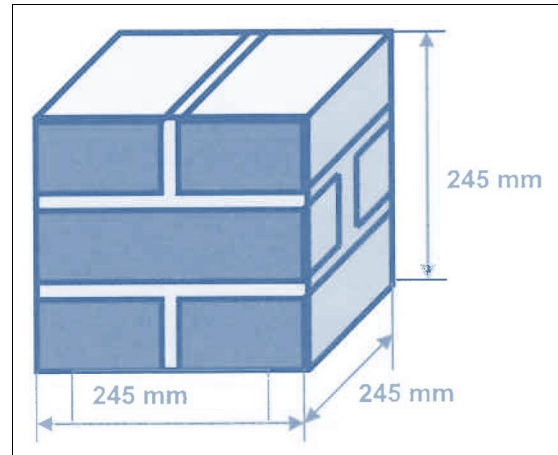
Gebäudeinstandsetzung Remmers- Akademie 2009 [116] und 2011 [117]

Es wird ein Forschungsprojekt zum Nachweis der Wirksamkeit von Injektionsmitteln vorgestellt. Es handelt sich um das Projekt am Thormannspeicher Wismar. Dieses Projekt wurde im Rahmen des multinationalen Forschungsprojekts Erosion and Humidity durchgeführt. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Langzeituntersuchungen zur Wirksamkeit von Injektionsmitteln zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung und zur anschließenden Trocknung durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden wiederholt Feuchtemogramme der zuvor behandelten Mauerwerke am Objekt erstellt und zudem gravimetrische Feuchtemessungen durchgeführt. Des Weiteren wurden w-Werte an aus dem Mauerwerk entnommenen Bohrkernen bestimmt. Es konnte das Trocknungsverhalten des Mauerwerks nach der Behandlung mit Injektionsmitteln belegt werden.

- Im Ergebnis wurde festgestellt, dass 42 Monate nach dem Injektionsmittel- Einsatz an allen Testflächen des Objektes eindeutige Tendenzen zur Abnahme des Durchfeuchtungsgrades gemessen worden sind
- Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde die Abdichtungsqualität AQ [%] beschrieben und definiert
- Das wichtigste Prüfprinzip an Prüfkörpern ist der W-Wert

In Abbildung 31 ist das Ergebnis an Messachse 4 und der verwendete Prüfkörper aufgeführt.

| Nr. | Thormann-Speicher Wismar; Ziegelmauerwerk, Fläche 4 der Fa. Remmers | |
|-----|---|---|
| 1 | Mittlerer w-Wert (Referenz) | 9,5 kg/m ² h ^{0,5} (stark saugend) |
| 2 | Mittlerer w-Wert (Ziegel/Injektionsmittel) | 0,6 kg/m ² h ^{0,5} (Wasser hemmend) |
| 3 | Zielstellung | 0,5 kg/m ² h ^{0,5} (Wasser abweisend) |
| 4 | Maximaler Reduzierungsfaktor: $R_{m;w} = 1 - \frac{0,5}{w_r}$ | 0,95 |
| 5 | Erreichter Reduzierungsfaktor: $R_{e;w} = 1 - \frac{w_i}{w_r}$ | 0,94 |
| 6 | Abdichtungsqualität: $AQ = \frac{R_{e;w}}{R_{m;w}} \cdot 100\%$ | 99 % |
| 7 | Qualitätsstufe: Injektionsmittelabdichtung. | ...funktionsfähig, weil AQ ≥ 90 |



a)

b)

Abbildung 31: a) Abdichtungsqualität in Messachse 4, b) Prüfkörper Prüfung nach BuFAS Merkblatt,
Quelle: Venzmer H., Buch Trockenlegung, Huss Medien 2003 [118]

Gebäudeinstandsetzung Remmers- Akademie 2016 [92]

Im Gebäudeinstandsetzungsbericht der Remmers- Akademie 2016 werden im Rahmen eines Nachweises von Injektionsmitteln folgende Feuchtenachweise beschrieben:

- Feuchte- / Salzbestimmungen
 - Bestimmung der Entnahmefeuchte nach DIN EN ISO 12570 / WTA- Merkblatt 04-11
 - Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme von Ziegeln gemäß DIN EN 772-21
 - Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades von mineralischen Baustoffen, WTA-Merkblatt 04-11
 - Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme von Natursteinen gemäß DIN EN 13755
 - Quantitative Bestimmung von Salzen mit Ionenchromatographie in Anlehnung an DIN EN 16455
- Prüfung des Mauerwerks auf Wirksamkeit der Injektionsabdichtung
 - Prüfung durch Bohrkernentnahme und örtlichen Kontaktwinkeltest mit der Sprühflasche

Relevanz der Veröffentlichungen der Remmers Akademie für die hiesige Arbeit

Injektionsmittel zur nachträglichen Bauwerksabdichtung kapillarer Mauerwerk werden seit über 40 Jahren eingesetzt. Der Injektionsmitteleinsatz und dessen Überprüfung der Wirksamkeit sind bis heute europaweit jedoch nicht normiert. Im Rahmen der letzten 40 Jahre wurden makroskopische Prüfverfahren für den Injektionsmitteleinsatz entwickelt. Es wurden jedoch bis heute keine mikroskopischen Verfahren vorgestellt. Die hiesige Arbeit wird als Ergänzung und Weiterentwicklung zu den veröffentlichten Prüfverfahren und Kriterien gesehen. Die veröffentlichten Prüfverfahren besitzen 2 deutlich nachteilige Eigenschaften:

- Es müssen große Prüfkörper im Labor erstellt werden
- Es wird ein über Jahre andauernder Messprozess benötigt

Demgegenüber kann das hier vorgestellte mikroskopische Verfahren zeitnah und ohne die Erstellung von Prüfkörpern auskommen. Es können qualitativ und quantitativ objektivierbare Prüfergebnisse erzeugt werden. Die hiesige Methode ist eine Weiterentwicklung der bestehenden Prüfmethode, da etablierte makroskopische Verfahren zur Korrelation herangezogen werden.

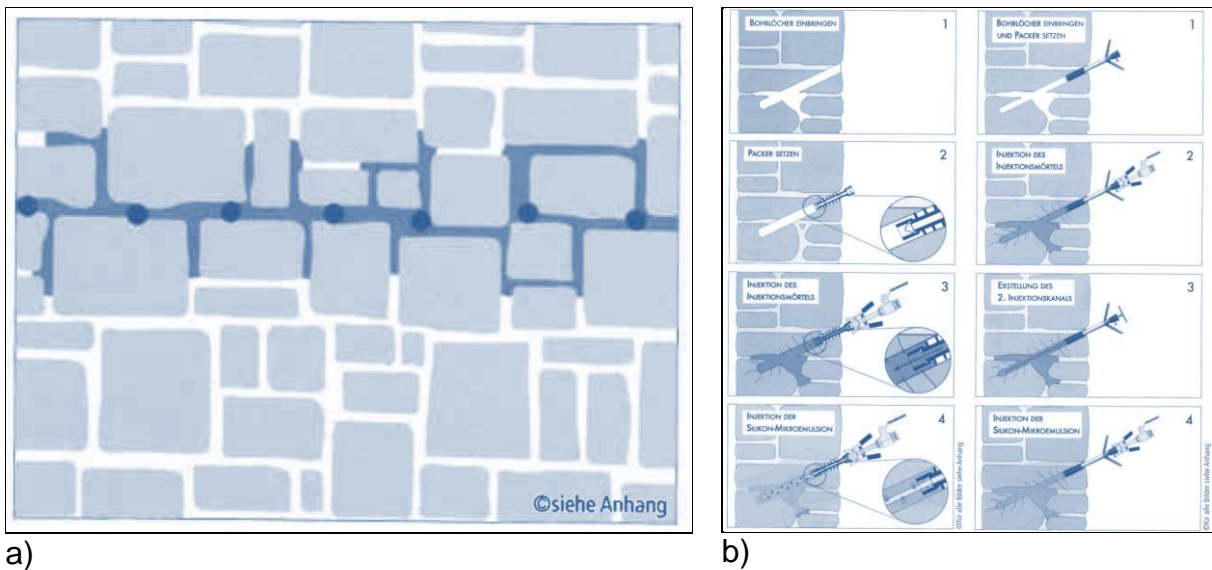
3.2.21 F. Frössel, Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung [7]

Nach Auffassung von F.Frössel geschieht die Verteilung von Injektionsmitteln im Mauerwerk nicht zwingend radial um das Bohrloch herum. Daher soll dem Fugennetz mehr Beachtung geschenkt werden. Dieses ist in Abbildung 32 dargestellt. Nach Auffassung F.Frössels werden vor allem die Fugen des Mauerwerks mit dem Injektionsmittel getränkt. So sei nach Auffassung von F.Frössel die Frage, ob an einem Mauerwerk eine Injektion mit oder ohne Druck appliziert wird, von der Porenstruktur und dem Durchfeuchtungsgrad abhängig. Zur Ermittlung dieser Fragestellung schlägt F.Frössel Probeinjektionen vor. Bei der Druckinjektion muss nach F.Frössel ferner darauf geachtet werden, dass sich der Druck auch tatsächlich im Mauerwerk aufbauen kann. Gegebenenfalls sind demnach Verdämmungen erforderlich.

Zur Überprüfung von applizierten Injektionsmitteln macht F.Frössel Ausführungen zum WTA- Prüfverfahren:

- Es sollen Prüfkörper erstellt und mit dem Injektionsmittel appliziert werden
- Zur Identifizierung des Injektionsmittels soll ein IR-Spektrum nach DIN 51451 / DIN EN 1767 erstellt werden
- Der Nachweis der Wirksamkeit des Injektionsmittels soll wie folgt geschehen: => Messen der Verdunstungsrate, => Messen des Rückgangs des Durchfeuchtungsgrades oberhalb der Injektionsebene, Nachweiszeitraum: => 60 Tage
- Zur Überprüfung der Verteilung des Injektionsmittels soll aus der Injektionsebene ein Bohrkern gezogen werden, welcher in mehrere Stücke geteilt wird, an denen dann die kapillare Feuchteaufnahme gemessen wird: => W-Wert- Messung (Anforderung mindestens wasserabweisend und um das Bohrloch mindestens wasserhemmend)

Für darüber hinausgehende Nachweise schlägt F.Frössel Messungen mithilfe der Feuchte-Tomographie und Berechnungen, bei denen die Porengeometrie einbezogen werden soll, vor.



a)

b)

Abbildung 32: a) Verteilung des Injektionsmittels im Verlauf der Fugen eines Mauerwerks,

b) Aufbau einer Mehrstufeninjektion, Quelle: Frössel F., Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung, 2002 [7]

Für längerfristige Messungen soll nach F.Frössel die Reduzierung des Feuchtegehaltes oberhalb der neu geschaffenen Abdichtungsebene (oberhalb der Injektionsebene) nachgewiesen werden. Die Wirksamkeit eines Injektionsmittels gilt nach F.Frössel als nachgewiesen, wenn nach 2 bis 3 Jahren (objekt-spezifisch und individuell) der Wirkungsgrad größer als 70% bis 75% ist.

$$W_{\text{Rest}} = \frac{F_v - F_n}{F_v - A_v} \cdot 100 [\%]$$

W_{Rest} – Wirkungsgrad in %
 F_v – Feuchtigkeitsgehalt vor der Injektion
 F_n – Feuchtigkeitsgehalt nach der Injektion
 A_v – Ausgleichsfeuchtigkeit vor der Maßnahme

Abbildung 33: Berechnung des Wirkungsgrades des Injektionsmitteleinsatzes,

Quelle: Frössel F., Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung, 2002 [7]

Die Berechnung des Wirkungsgrades ist in Abbildung 33 aufgeführt. Alternativ kann die Reduzierung des Durchfeuchtungsgrades auf max. 20%, überprüft werden (entspricht der österreichischen ÖNORM B 3355-1). F.Frössel macht zudem Ausführungen über den Bedarf an Verdämmungen bei hohlräumigem Mauerwerk. Dieses wird in Abbildung 32 in der 3-Stufen Injektion erläutert.

Relevanz der Veröffentlichung für die hiesige Arbeit

Im Prinzip wird die Aussage von F.Frössel, dass sich Injektionsmittel nicht zwingend radial verteilen durch die hiesige Arbeit bestätigt. Dennoch breiten sich Injektionsmittel im Gegensatz zur Auffassung von F.Frössel nicht ausschließlich über die Mauerwerksfugen aus. Auch Ziegel, als integraler Bestandteil von Mauerwerken, werden von Injektionsmitteln penetriert. Die Problematik der unsymmetrischen Ausbreitung besteht häufig auf Grund von Anomalien, die sich im Ziegel befinden können, da dieser beispielsweise im Brennprozess nicht gleichmäßig gebrannt werden konnte. Die Konzentration darauf vor allen Dingen die Fugen eines Mauerwerks mit Injektionsmitteln zu penetrieren ist insofern nachvollziehbar, jedoch zu kurz gegriffen. Es muss nach wie vor Aufgabe des Injektionsmitteleinsatz sein, neben den Fugen auch die Ziegel mit Injektionsmittel zu penetrieren. Der Vorschlag F.Frössels Probeinjektionen vorzunehmen führt zu dem Schluss, dass ein schnelles, sicheres Nachweisverfahren erforderlich ist, da die Wirksamkeit der Probeinjektionen nachzuweisen ist. Diese Aussage wird durch die hiesige Arbeit gestützt. Dennoch werden zudem Qualitätsüberprüfungen, die während der Injektionsarbeiten durchgeführt werden können, benötigt. Aus diesen Gründen wird in der hiesigen Arbeit das Erfordernis für ein Nachweisverfahren gesehen, bei dem die ungleichen Ausbreitungsgeometrien schnell und sicher erfasst werden können. Dieses ist mit dem hier vorgestellten mikroskopischen Verfahren möglich. Das mikroskopische Verfahren wird mit den makroskopischen Verfahren korreliert. Auf diese Weise ist es eine Weiterentwicklung bestehender Verfahren. Das Mikroskopische Verfahren ersetzt die bereits bekannte Zertifizierung von Injektionsmitteln nicht. Es ist vielmehr geeignet die Wirksamkeit der tatsächlich vor Ort ausgeführten Injektionsmittel-Abdichtungsarbeiten:

- zu überwachen
- nachzuweisen

3.2.22 H. Venzmer (Hrsg): Europäischer Sanierungskalender [119], [120], [121], [122], [123]

Unter der Herausgeberschaft / Autorenschaft von H.Venzmer ist die umfangreichste Sammlung von Veröffentlichungen zum Thema nachträgliche Injektionsmittel- Horizontalabdichtungen erschienen. Dabei wurden im Europäischen Sanierungskalender, der seit 2006 die Forschung zu diesem Thema bündelt, diverse Veröffentlichungen im Hinblick auf die Erfolgskontrolle nachträglicher Maßnahmen gegen aufsteigende Feuchtigkeit publiziert. Der Europäische Sanierungskalender 2008 veröffentlicht eine Arbeit von Simlinger und Balak zum Thema hydrophobierende und porenverschießende Injektionsmittel zur nachträglichen Horizontalabdichtung. Eine Arbeit die 8 Injektionsmittel an einem Bauwerk (ZMK-Klinik in Wien) unter Einstellung der verschiedensten Parameter wie $D_{(g)}$, Temperatur und Injektionsverfahren vergleicht und die Funktionalität nachzuweisen versucht. Im Ergebnis sind die Bohrlochabstände zu reduzieren, da die Funktionalität der Injektionsmittel bei einem $D_{(g)}$ von 80% nicht mehr gegeben und bereits bei einem $D_{(g)}$ von 50% problematisch ist. Es wird empfohlen zwei Bohrlochreihen anzulegen. Auf Grund der festgestellten Inhomogenitäten der Baustoffe an den bestehenden Objekten werden Probeinjektionen für erforderlich gehalten.

C.Simlinger, Europäischer Sanierungskalender (Venzmer, Hrsg): Erfolgskontrolle nachträglicher Maßnahmen gegen aufsteigende Feuchtigkeit, 2006 [119]

Nach C.Simlinger sollen bei der Überprüfung von Injektionsmitteln folgende Baustoffkennwerte bestimmt werden:

- Feuchtigkeitsgehalt F [Masse-%]
- hygroskopische Ausgleichsfeuchtigkeit
- maximale Wasseraufnahme W_{max}
- Durchfeuchtungsgrad $D_{(g)}$ [%]
- Restsaugfähigkeit R [Masse-%]
- hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad $D_{(g)hyg}$ [%]
- Ionenkonzentration von Chloriden, Nitraten und Sulfaten (bauschädliche Salze)
- pH-Wert

Die Feststellung des Wirkungsgrades W der nachträglichen Abdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit wurde mit der Formel in Abbildung 33 nach ÖNORM B 3355-1 ermittelt.

Die Wirksamkeit der Injektionsmittel- Anwendung ist nach C. Simlinger gemäß ÖNORM B 3355-1 gegeben:

- wenn eine Wirksamkeit von 70% erreicht wurde oder
- wenn durch Messungen eine Prognose der Wirksamkeit 70% für einen definierten Zeitraum möglich ist
- wenn nicht anders vereinbart, gilt ein Zeitraum von 2 Jahren.
- Der letzte Wert der Wirksamkeit der Messreihe muss mindestens die Hälfte des Prognosewertes betragen wenn der Durchfeuchtungsgrad des trockengelegten Mauerwerkes maximal 20% beträgt.
- Die zweite Bedingung (Prognose der Wirksamkeit) spielt bei Langzeituntersuchungen keine Rolle, da die Wirksamkeit nach den beiden weiteren Bedingungen in der Zwischenzeit eingetreten sein sollte.

H.Venzmer / M.Ryschtschenko / N.Lesnych / E.Fedorenko / L.Koss, Europäischer Sanierungskalender (Venzmer, Hrsg): Zur Prüfung der Effizienz von Injektionsmittel- Horizontalabdichtungen, 2008 [121]

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird zum einen auf das Untersuchungsprogramm zur Prüfung der Injektionsmittel am Thormannspeicher eingegangen, siehe dazu 3.2.19. Zum anderen wird auf die Prüfmethodik, die in das BuFAS- Ingenieurmerkblatt eingeflossen ist, eingegangen siehe dazu 3.2.19. In diesem Zusammenhang werden die Feuchte- Messmethode: Feuchtetomographie und die Definition der Abdichtungsqualität AQ vorgestellt [68]. Es handelt sich um die umfangreichste und intensivste Auseinandersetzung mit dem Thema der ‚Überprüfung der Wirksamkeit von Injektionsmitteln‘, die an kapillaren Mauerwerken eingesetzt wurden, die derzeit vorliegt.

Relevanz der Veröffentlichungen des Sanierungskalenders für die hiesige Arbeit

Allen in den Veröffentlichungen beschriebenen bisher bekannten Nachweisverfahren der Wirksamkeit von Injektionsmitteln ist gemeinsam, dass diese Verfahren große Zeitspannen benötigen um Ergebnisse zu produzieren. Dieses gilt auch für den in der ÖNORM vorgestellten Wirkungsgrad W. Die Problematik liegt im Bauablauf und in den Baustellenbedingungen. Demgemäß muss zum einen möglichst bei Beginn der Injektionsmittelarbeiten ein Korrektiv durch einen Schnelltest möglich sein. Mit einem solchen Schnelltest kann der Injektionsvorgang wenn nötig angepasst werden. Zum anderen muss direkt nach Fertigstellung der Injektionsarbeiten (nach dem Ausreagieren des Injektionsmittels) nachgewiesen werden, ob die Injektionsarbeiten zum erwarteten Abdichtungserfolg führen. Für den Nachweisvorgang dürfen nicht Zeitspannen von mehreren Monaten oder von Jahren gelten.

Ebenso wie bei den Veröffentlichungen von F.Frössel zeigen auch die Veröffentlichungen des Europäischen Sanierungskalenders daher den Bedarf an einem neuen Injektionsmittel- Nachweisverfahren auf. Bei einem solchen neuen Nachweisverfahren müssen örtlich Proben entnommen werden können, welche kurzfristig im Labor auf die Wirksamkeit des Injektionsmittels hin untersucht werden können. Das in dieser Arbeit vorgestellt mikroskopische ESEM-Verfahren benötigt lediglich sehr geringe Probenmengen. Auf diese Weise ist es möglich Proben einzuschicken, die in einem geeigneten Labor untersucht werden. Das mikroskopische Verfahren kann schnell qualitative und quantitative Ergebnisse zur Wirksamkeit des untersuchten Injektionsmittels am konkreten Objekt liefern. In der hiesigen Arbeit wurden dazu die konventionellen Verfahren in einer ersten Stufe durchgeführt und mit den Ergebnissen des mikroskopischen Verfahrens korreliert. Es handelt sich daher bei dem hier vorgestellten mikroskopischen Nachweisverfahrens um eine Weiterentwicklung bestehender Verfahren, das parallel eingesetzt werden kann.

4. MESSMETHODEN DER WASSERAUFNAHME

4.1 Saugvermögen kapillarer Baustoffe

Kapillarporöse Baustoffe besitzen ein Kapillargefüge, das sich durch Feuchteangebote bis zur Sättigung anreichern kann. Im Bereich erdberührter Bauteile geschieht dieses insbesondere durch die Eigenschaft des kapillaren Saugens. Injektionsmittel zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung sollen kapillarporöse Baustoffe in der Injektionsebene so verändern, dass die Baustoffe ihre Saugfähigkeit in wesentlichen Teilen verlieren und der Wassertransport dadurch unterbunden wird. Nachfolgend werden die, dem derzeitigen Stand der Wissenschaft entsprechenden, hier relevanten, Messmethoden der Wasseraufnahme an Baustoffen vorgestellt und erläutert.

4.2 Bestimmung des Wassereindring- Wertes (w-Wert)

Als w- Wert wird der Wassereindring- Wert bezeichnet. Das heißt es handelt sich um einen Wert, der den Anteil des Wassers, welcher über eine bestimmte Größe einer Oberfläche eines Stoffes in Bezug auf die Zeit aufgenommen wird, angibt. Auf diese Weise werden die Wasseraufnahme und die Sauggeschwindigkeit eines Stoffes bestimmt. Der w-Wert ist in Europa normiert [124]:

- DIN EN ISO 15148

Der Wasseraufnahmekoeffizient w - auch w-Wert genannt - ist eine spezielle Kenngröße, die das kapillare Saugvermögen von festen Stoffen charakterisiert. Der w-Wert folgt dem Wurzel-Zeit Gesetz.

A) Der Wassereindring- Koeffizient wird nach der Gleichung in Formel 9 berechnet

$$B = \frac{h}{\sqrt{t}}$$

$B =$ Wassereindring- Koeffizient

$h =$ Steighöhe

$\sqrt{t} =$ Zeit

Formel 9: Wassereindring-Koeffizient

B) Der Wassereindring- Wert (w-Wert) wird nach der Gleichung in Formel 10 berechnet

$$w = \frac{\Delta M}{A \cdot \sqrt{t}}$$

$w =$ Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$

$\Delta M =$ aufgenommene Wassermasse
bis zum Zeitpunkt t in g/m^2

$t =$ Saugzeit in Stunden (h)

$A =$ Saugfläche

Formel 10: Wassereindringwert: w-Wert

Die nach Formel 10 berechneten Ergebnisse werden in Form eines Diagramms (Massezunahme als Funktion der Zeit) dargestellt (siehe dazu Abbildung 34). Für einen Baustoff sind zwei Größen auf diesem Diagramm besonders charakteristisch:

- Der Anstieg der Wasseraufnahmefunktion vor dem Erreichen des Knickpunktes und
- Die absolute Größe der erreichten Feuchteaufnahme, die auch als Wasserkapazität bezeichnet wird.

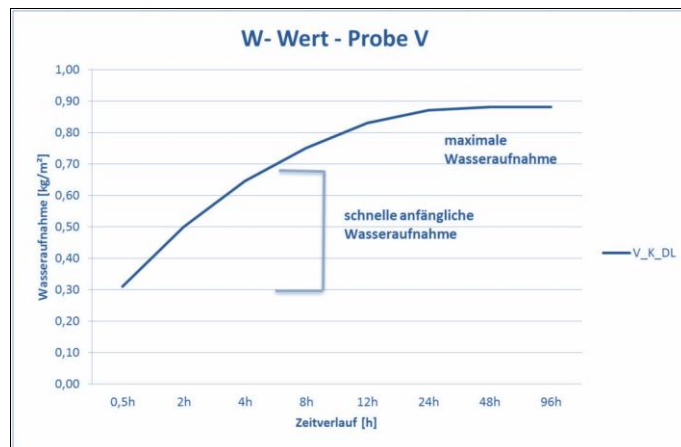


Abbildung 34: W- Wert der Ziegel-Probe V, Quelle: Körber P.

Nach DIN EN 15148 und DIN EN 1062 wird der Wasseraufnahmekoeffizient für die Saugzeit von 24 Stunden bestimmt. Anhand des w - Wertes lassen sich die Baustoffe hinsichtlich ihres kapillaren Saugverhaltens einteilen. Je niedriger der w -Wert, umso geringer ist die Wasseraufnahme oder Wasserdurchlässigkeit. Im Ergebnis wird die Saugfähigkeit eines Stoffes, wie in Abbildung 35 dargestellt, beschrieben. Diese Klassifizierung des w -Wertes [$\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{t}$] wird in der hiesigen Arbeit verwendet.

| | |
|---|-----------------|
| $w \geq 2,0 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ | stark saugend |
| $w \leq 2,0 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ | wasserhemmend |
| $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ | wasserabweisend |
| $w \leq 0,001 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ | wasserdicht |

Abbildung 35: Einordnung der Messergebnisse des w -Wertes in Anlehnung an DIN EN 1062 T3, Quelle: J. Weber, Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung Seite 38 [20]

4.3 Messung des Kontaktwinkels

Als Kontaktwinkel θ wird der Winkel zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und dem Umriss der Kontaktfläche bei einer Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff bezeichnet. In Abbildung 36 sind die Bewegungsmöglichkeiten der Flüssigkeitsmoleküle eines liegenden Tropfens illustriert [125], [126], [127], [128].

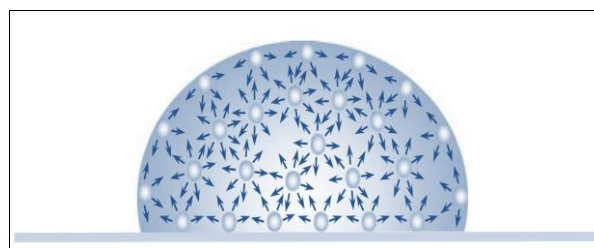


Abbildung 36: Illustration der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit, Quelle: Contact angle and wetting Properties, Y.Yuan and T.R.Lee, University of Houston USA, G.Bracco and B.Holst (Edts) in Surface Science Techniques, Springer Verlag, 2013 [103]

Die äußere Spannung einer Flüssigkeit ist durch das Ungleichgewicht von Molekülen innerhalb der Flüssigkeit und am Rand der Flüssigkeit (Grenzfläche zwischen flüssig und gasförmig) definiert. Diese intermolekulare Kraft, welche die Oberfläche zusammenzieht, wird Oberflächenspannung genannt. Auf Grund der Oberflächenspannung wird ein Tropfen geformt. Zudem spielen äußere Einflüsse und

beispielsweise die Gravitation eine Rolle für die Tropfenform. Der Kontaktwinkel eines Tropfens entsteht an der Kontaktfläche des Tropfens auf einem Feststoff und ist ebenfalls von der Tropfenform abhängig. Der Kontaktwinkel kann Aussagen über die Benetzbarkeit eines Feststoffes mit einer Flüssigkeit machen. Die Messung des Kontaktwinkels eines auf eine Bauteiloberfläche aufgesetzten Wassertropfens kann makroskopisch oder mikroskopisch durchgeführt werden.

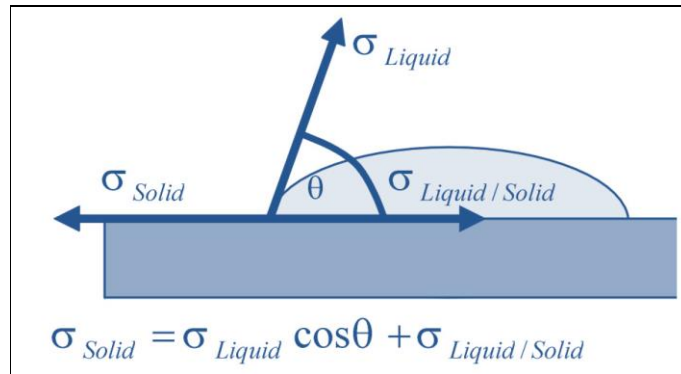


Abbildung 37: Prinzip der Kontaktwinkelmessung,

Quelle: Krüss AR229_DE Application Report [128]

Wasser ist zur Durchführung einer Kontaktwinkelmessung gut geeignet, da es sich durch eine relativ große Oberflächenspannung auszeichnet ($=0,072 \text{ n/m}$). In Abbildung 37 ist das Prinzip der Kontaktwinkelmessung illustriert. Der statische Kontaktwinkel wird durch Anlegen einer Tangente in dem Punkt, wo der aufgesetzte Wassertropfen die Festkörperoberfläche und die Umgebungsphase (hier Luft) berührt, gemessen. Mit zunehmender Benetzbarkeit des Festkörpers (Baustoff- Oberfläche) nimmt der Kontaktwinkel ab. Der Kontaktwinkel θ , als ein Winkel an der Phasengrenze der gasförmigen, flüssigen und festen Phasen von gasumgebenen Flüssigkeiten auf einer festen Oberfläche, wurde bereits im Jahr 1805 durch Thomas Young in definiert und ist in Formel 11 aufgeführt:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta$$

γ_{SG} = Grenzflächenspannung zwischen fest und gasförmig

γ_{SL} = Grenzflächenspannung zwischen fest und flüssig

γ_{LG} = Grenzflächenspannung zwischen flüssig und gasförmig

Formel 11: Grenzflächenspannung zwischen fest und gasförmig

Die Youngsche Gleichung zur Berechnung des Kontaktwinkels ist in Formel 12 aufgeführt und in Abbildung 38 erläutert.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$$

Formel 12: Youngsche Gleichung zur Berechnung des Kontaktwinkels

Durch die Oberflächen- / Grenzflächenspannung wird die ‚Arbeit‘ definiert, die erforderlich ist, um die Grenzfläche zu vergrößern. Innerhalb der Flüssigkeit bestehen Wechselwirkungen der enthaltenen Moleküle in alle Richtungen (Kohäsion), während an der Grenzfläche Wechselwirkung der Flüssigkeitsmoleküle nach außen fehlen (Adhäsion). Die Youngsche Gleichung beschreibt das Gleichgewicht dieser Kräfte. Dieses wird an der Dreiphasenkontaktlinie betrachtet und besteht dann, wenn sich die Kontaktlinie im Gleichgewicht und in Ruhe befindet. Dann heben sich die horizontalen Kräfte, die auf die Kontaktlinie wirken, genau gegenseitig auf. Die Grenzflächenspannung ist

temperaturabhängig, somit hängen auch die Kontaktwinkel von der Temperatur ab und verringern sich bei den meisten Substanzen bei steigender Temperatur.

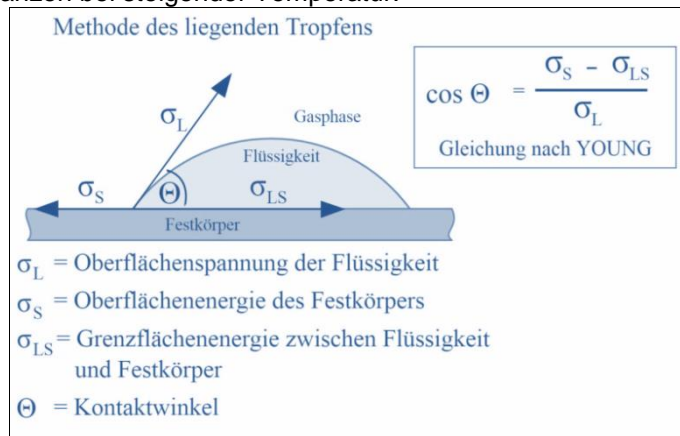


Abbildung 38: Erläuterung der Youngschen Gleichung,

Quelle: Krüss Application Report AR 230D: Kontaktwinkel [1 2 7]

Weil außer der Oberflächenspannung noch weitere Kräfte auf die Kontaktlinie einwirken, kann der Youngsche Kontaktwinkel an sich jedoch nicht gemessen werden. Liegen Bewegungen der Kontaktlinie vor, spricht man von ‚dynamischen Kontaktwinkeln‘. Bei Vergrößerung des Tropfenvolumens spricht man von ‚Fortschreitkontaktwinkeln‘, während man bei Verdunstung von Flüssigkeiten von ‚Rückzugskontaktwinkeln‘ spricht. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass der Fortschreitkontaktwinkel immer größer ist als der Rückzugskontaktwinkel. Die Differenz dieser beiden Kontaktwinkel wird ‚Kontaktwinkelhysterese‘ genannt, siehe dazu Formel 13. [129]

4.3.1 Messung des Kontaktwinkels an Baustoffen

Die hydrophilen oder hydrophoben Eigenschaften von Stoffen lassen sich mit einem Benetzungswinkelmessgerät (Drop Shape Analysis System) exakt feststellen.

Ein von hinten beleuchteter Tropfen wird mit einer Kamera beobachtet und auf einem Monitor abgebildet. Durch dieses Verfahren wird ein statischer Kontaktwinkel gemessen, indem vereinfachend davon ausgegangen wird, dass zur Kontaktwinkelmessung statische Bedingungen vorliegen. Tatsächlich ist dem nicht so, denn auch auf diese Weise ermittelte Kontaktwinkel unterliegen während der Messung gewissen, wenn auch sehr geringen, Veränderungen. Diese Ungenauigkeit geht jedoch in der zu veranschlagenden Toleranz auf und kann daher für die hier betrachteten Zwecke unbeachtlich bleiben [128], [130], [131].

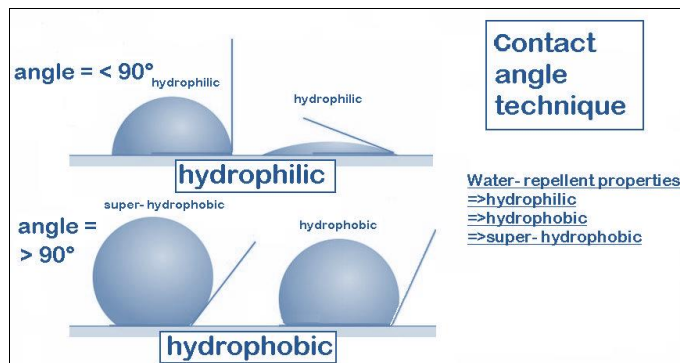


Abbildung 39: Illustration der Auswertung einer Kontaktwinkelmessung im

Tangentenverfahren, Quelle: Körber P.

Die Messung des statischen Kontaktwinkels kann im Tangentenverfahren erfolgen, wie in Abbildung 39 dargestellt. Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen bei Baustoffen werden anhand der 90°-Grenze in A) hydrophob $> 90^\circ$ und B) hydrophil $< 90^\circ$ differenziert.

Über die 90°-Grenze hinaus geben die einzelnen Winkel- Messwerte jedoch zudem Auskünfte über die graduelle Wasseraufnahmefähigkeit des Stoffes. Die direkte Messung des statischen Kontaktwinkels mit einem Teleskop-Goniometer kann eine Genauigkeit von etwa $\pm 2^\circ$ erreichen. Sofern ein dynamischer Prozess aus Kondensation / Verdampfen vorliegt, können statische Kontaktwinkel nur dann gemessen werden, wenn das dynamische Gleichgewicht zwischen Kondensation und Verdampfung erreicht ist.

4.3.2 Kontaktwinkel- Messverfahren / -Bestimmungen

Zur Ermittlung der Kontaktwinkel bestehen folgende Verfahren (wichtigste):

- Tropfenkonturverfahren mit rechnerischer Auswertung der Tropfenkontur
- Tangentenverfahren
- Höhen- und Breiten- Verfahren
- Kreissegmentverfahren
- Young Laplace Fitting- Verfahren
- Auswertung der gesamten Tropfenkontur
- Tropfenbild- Verfahren

Nachfolgend werden die wichtigsten Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Kontaktwinkeln grundsätzlich erläutert.

4.3.2.1 Statische Kontaktwinkel

Der statische Kontaktwinkel gibt Aufschluss über die Oberflächenenergie des Feststoffs. Der statische Kontaktwinkel kann bei Vorliegen der Voraussetzungen verzerrungsfrei gemessen werden. Abhängig von den Messgegebenheiten kann sich jedoch der Kontaktwinkel im Rahmen der Messung etwaig durch folgende Parameter verändern:

- Verdampfen der Tropfenflüssigkeit
- Migration der Tropfenflüssigkeit in das Probematerial
- Anlösen und -quellen des Festkörpers durch die Flüssigkeit
- chemische Reaktionen zwischen Festkörper und Flüssigkeit
- Migration oberflächenaktiver Stoffe von der Festkörperoberfläche in die Flüssigkeitsoberfläche.

Können die oben aufgeführten Parameter ausgeschlossen oder klein gehalten werden, ist die statische Kontaktwinkelmethode geeignet.

4.3.2.2 Dynamische Kontaktwinkel

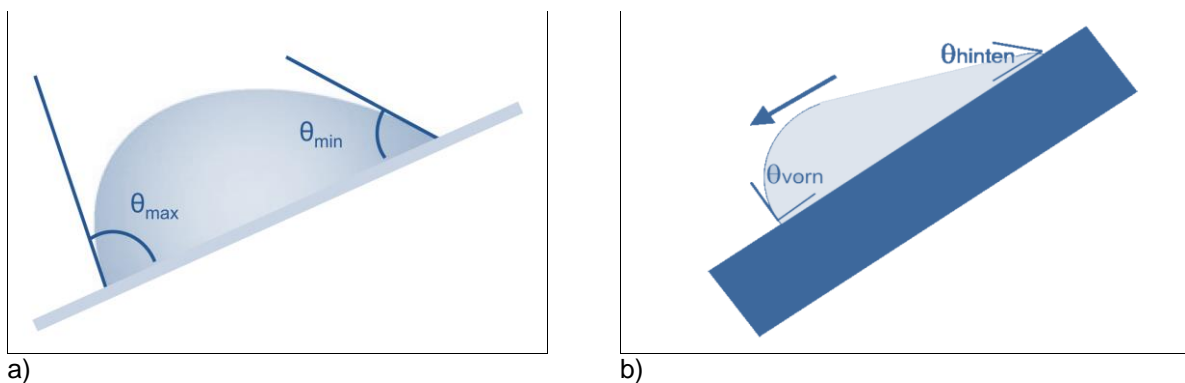


Abbildung 40: a) Fortschritt- und Rückzugswinkel, Quelle: Contact angle and wetting Properties, Y.Yuan and T.R.Lee,

University of Houston USA, G.Bracco and B.Holst (Edts) in Surface Science Techniques, Springer Verlag, 2013 [103]

b) Fortschritt- und Rückzugswinkel , Quelle: Dissertation Viel B., TU Darmstadt, 2007 [132]

Es handelt sich bei den dynamischen Kontaktwinkeln um Fortschritt- oder Rückzugswinkel, also um sich ändernde Winkel. Die dynamische Kontaktwinkel- Messung eignet sich, wenn die Einflüsse von Oberflächen- Rauheiten minimiert werden sollen. Der Fortschrittwinkel wird an vielen nebeneinander liegenden Positionen gemessen, daher spielt bei dieser Messmethode die Kondensation / Verdunstung eine Rolle. Zudem kann bei vorhandenen Inhomogenitäten besser gemessen werden. Es ist anzunehmen dass der Rückzugswinkel auf Grund der Rauheit des Festkörpers in der Regel geringer ausfällt als der Fortschrittwinkel. In Abbildung 40 entsteht auf Grund der Neigung links ein Fortschrittwinkel (oder Vorschubwinkel), während rechts am Tropfen ein Rückzugswinkel entsteht. Bei dynamischen Kontaktwinkeln liegt eine Veränderung zu Grunde, die in einer bestimmten Zeitspanne abläuft. Bei einer Messung von dynamischen Kontaktwinkeln können unter Zugrundelegung einer geringen Geschwindigkeit, Kontaktwinkel gemessen werden, die statischen Winkeln gleichkommen. Dynamische Kontaktwinkel werden durch die Kondensation und die Verdunstung oder als Abrollwinkel an schrägen Flächen provoziert. Der Unterschied zwischen Fortschrittwinkel (oder Vorschubwinkel) und Rückzugswinkel wird als Hysterese [H] bezeichnet. Nachfolgend ist die Formel für die Berechnung der Hysterese in Formel 13 dargestellt:

$$H = \theta_a - \theta_r$$

θ_a = Fortschrittkontaktwinkel

θ_r = Rückzugskontaktwinkel

Formel 13: Formel für die Kontaktwinkelhysterese

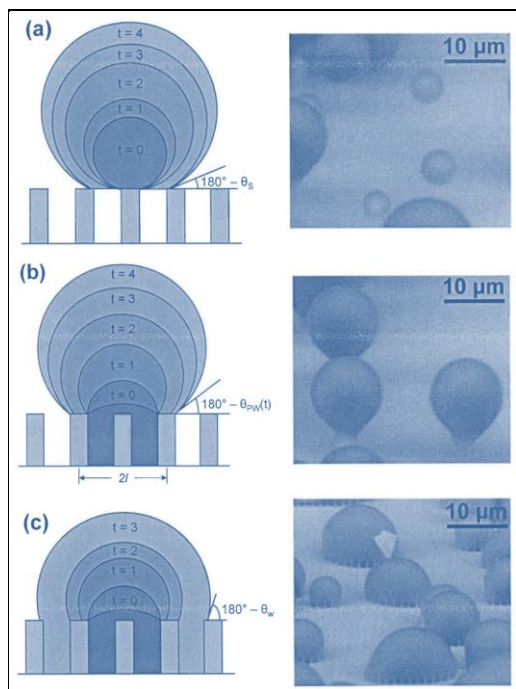


Abbildung 41:

Zeitraffer- Aufnahmen / -Diagramme einer Tröpfchenbildung auf einer strukturierten Oberfläche:

- a) => aufgesetzter Tropfen
- b) => teilweise Befeuchtung der Tiefpunkte der Oberfläche
- c) => Wenzel- Effekt.

Der Kontaktwinkel verändert sich im dynamischen Vorgang. Auf den rechten Bildern ist die Entwicklung im ESEM beobachtet.

Quelle: Modelling and optimization of superhydrophobic condensation , N. Miljkovic, R. Enright and E. N. Wang, MIT Cambridge Massachusetts USA and University of Limerick Ireland, Journal of Heat Transfer 135, No. 11, 2013 [102]

Da die Youngsche Gleichung die topographischen Eigenheiten, wie die Oberflächenrauheit der Feststoffoberfläche, nicht berücksichtigt, mussten weitere Aspekte der Kontaktwinkelmessung definiert werden. Hierzu sind Effekte durch Wenzel / Cassie / Baxter untersucht worden. Die gemessenen Kontaktwinkel werden daher als Wenzel- oder Cassie-Baxter-Winkel bezeichnet und sind nicht gleichbedeutend mit dem Youngschen Kontaktwinkel. Insoweit kann die Youngsche Gleichung nur für Kontaktwinkel auf glatten und waagerechten Oberflächen gelten. Im Fall, dass ein Tropfen eine Oberfläche homogen benetzt, dringt die Flüssigkeit in alle Unebenheiten / Vertiefungen der Oberfläche ein. Die rauhe Topographie eines Feststoffs wird somit vollständig mit der Flüssigkeit bedeckt. Nach Wenzel hängt der Kontaktwinkel von der Rauheit des Feststoffs ab.

Anders verhält es sich bei einem Tropfen der die Feststoffoberfläche heterogen benetzt. Ein solcher Tropfen liegt nur oben auf den Erhebungen der Oberflächentopographie auf und benetzt die Tiefpunkte dieser Topographie nicht (Cassie). Beide Effekte sind graphisch in der Abbildung 42 dargestellt.

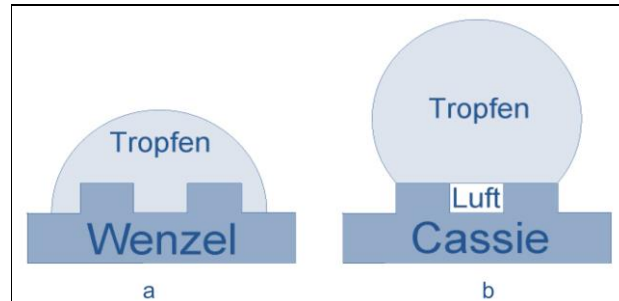


Abbildung 42: Grenzfälle der Benetzung: a) =>homogen nach Wenzel, b) =>heterogen nach Cassie,

Quelle: Dissertation Viel B., TU Darmstadt, 2007 [132]

4.3.2.3 Tropfenkonturanalysen

Bei der Tropfenkonturanalyse (=Drop Shape Analysis, DSA) werden Bilder von den sich bildenden Tropfen geschossen, welche softwaremäßig untersucht werden. Der Kontaktwinkel wird anhand eines Bildes ermittelt. Die Software kann das aufgenommene Bild schärfen und die Kontur des Tropfens erkennen. Die Messung erfolgt rechnergestützt über ein geometrisches Modell. Im nächsten Schritt kann die Oberflächenspannung mittels des ‚Young-Laplace-Fit‘ berechnet werden, wenn die Dichtedifferenz und der Abbildungsmaßstab zwischen Tropfenphase und umgebender Phase bekannt sind. Die achssymmetrische Tropfenformanalyse (Axisymmetric Drop Shape Analysis, ADSA) ist eine rechnergestützte Tropfenkonturanalyse mit sehr hoher Genauigkeit $\pm 0,2^\circ$. [133]

Die Berechnung der optisch gemessenen Tropfenkontur kann auch mittels einer Kegelschnittgleichung ermittelt werden =>Kegelschnittmethode. Der Kegelschnittmethode liegt die Annahme zugrunde, dass die Kontur des zu messenden Tropfens einen Ellipsenbogen beschreibt. Eine weitere Untergruppe der Tropfenkonturanalyse ist die Captive- Bubble- Methode, bei der eine Luftblase unterhalb eines Festkörpers platziert wird. Die Oberfläche des Festkörpers befindet sich in der Flüssigkeit.

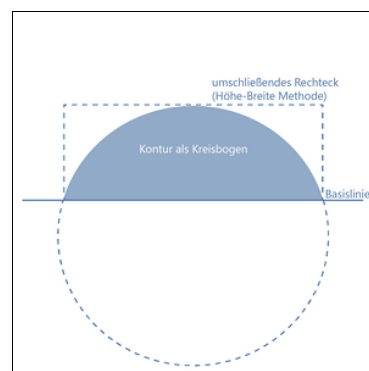


Abbildung 43: Kontaktwinkelmessung mit der Höhen-Breiten Methode,

Quelle: Krüss Schulung-Theorie [134]

Unter der Annahme, dass die Kontur des liegenden Tropfens auf der Oberfläche einen Kreisbogen beschreibt, wird als eine weitere Tropfenkonturanalyse die ‚Höhen-Breiten- Methode‘ rechnerisch durchgeführt. Der Kontaktwinkel wird letztendlich aus dem Rechteck berechnet, das den Kreisbogen umspannt, wie in Abbildung 43 ersichtlich. Es kommen gemäß dem Winkel unterschiedliche Gleichungen zur Anwendung. Geometrisch kann der Kontaktwinkel auch nach der $\theta / 2$ -Methode durch die Messung des Tropfendurchmessers und der Höhe des Tropfenbogens bestimmt werden. Es wird dazu die nachfolgend in Formel 14 aufgeführte Gleichung verwendet. Die $\theta / 2$ -Methode ist in Abbildung 44 illustriert.

$$\frac{\theta}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d} \right)$$

θ = Kontaktwinkel

h = Höhe Tropfen

d = Tropfenradius

Formel 14: Kontaktwinkelmessung nach der $\theta / 2$ -Methode

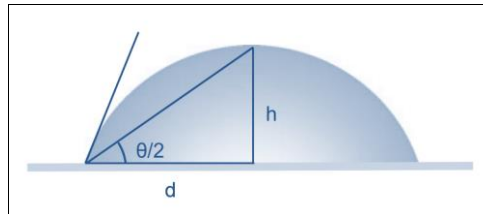


Abbildung 44: Kontaktwinkelbestimmung durch die Messung Tropfendurchmessers,
Quelle: Contact angle and wetting Properties, Y.Yuan and T.R.Lee, University of Houston USA,
G.Bracco and B.Holst (Edts) in Surface Science Techniques, Springer Verlag, 2013 [103]

In dieser Arbeit wurden die im ESEM gemessenen Tropfen durch eine Tropfenkonturanalyse gemessen. Um die im ESEM festgestellten Tropfen mittels Konturanalyse messen zu können, wurde in dieser Arbeit die zuvor beschriebene Höhen-Breiten- Methode weiterentwickelt. Im Ergebnis wird in 9.3.7 die in dieser Arbeit definierte ‚Geometrische- Tropfen- Kontur- Analyse‘ vorgestellt.

4.3.3 Definition: Hydrophob - Hydrophil

Der Begriff Hydrophob (hydrophobic) ist aus dem Altgriechischen entlehnt (hýdor = Wasser und phob = abstoßend). Hydrophob beschreibt eine wasserabweisende, wasserscheue Eigenschaft eines Stoffes. Das bedeutet, dass der Stoff sich nicht in Wasser lösen und/oder sich nicht von Wasser benetzen lässt. Der Begriff Hydrophil (hydrophilic) ist ebenfalls aus dem Altgriechischen entlehnt (hýdor = Wasser und philos = liebend). Hydrophil bedeutet, dass ein Stoff wasserfreundlich, wasserliebend ist. Hydrophil beschreibt eine wasserannehmende Eigenschaft eines Stoffes. Das bedeutet, dass der Stoff sich in Wasser lösen und/oder mit Wasser benetzen lässt.

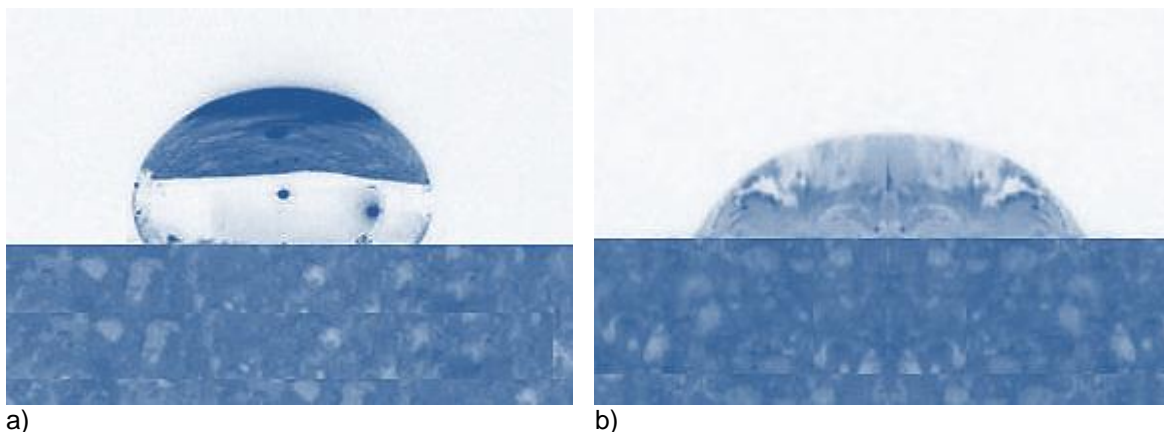


Abbildung 45: Beispiele anhand eines Tropfenaufsetztests: a) Oberfläche ist hydrophob,
b) Oberfläche ist hydrophil, Quelle: Körber P.

5. THESEN ZUM INJEKTIONSMITTEL – NACHWEIS

5.1 4 Thesen zum Nachweis von Injektionsmitteln im Mauerwerk

5.1.1 **These 1:** Auf Grund von Anomalien im Baustoff und im Mauerwerk sind Labor- Reihenuntersuchungen zur Kapillarität von, mit Injektionsmitteln behandelten Baustoffen, analog zur WTA-Zertifizierung allein nicht aussagefähig. Es sind zudem Qualitäts- und Wirksamkeitsnachweise an Proben vom Objekt erforderlich.

Da Injektionsmittel zur nachträglichen Bauwerksabdichtung von kapillaren Mauerwerken ihrem Wesen nach bei der Sanierung von Altbauten und insbesondere im Denkmalbereich eingesetzt werden, bestehen zunächst keine Erkenntnisse über die tatsächliche Beschaffenheit der zu behandelnden Mauerwerke. Diese Kenntnisse über das mit der Injektion zu versiehende Mauerwerk werden durch die Gebäude- und Mauerwerksdiagnostik im Vorfeld der Injektionsarbeiten gewonnen. Dennoch bleiben etwaige Anomalien im Baustoff und im Mauerwerk als Risiken für die Wirksamkeit der Injektionsmittelabdichtung bestehen und können im Vorfeld letztendlich nicht voll umfassend ermittelt werden. Es sind daher eine baubegleitende Qualitätsüberwachung während der Injektionsarbeiten und eine abschließende Wirksamkeitsüberprüfung erforderlich.

5.1.2 **These 2:** Im Nachgang zu der Anwendung von Injektionsmitteln zur nachträglichen Bauwerksabdichtung ist ein Nachweisverfahren zur Dokumentation der Wirksamkeit des Injektionsmittel- Einsatzes und zur Überprüfung, inwieweit die Abdichtungsziele erreicht sind, erforderlich

Im Nachgang zu Injektionsarbeiten zur nachträglichen Bauwerksabdichtung ist zu beobachten, dass es zunächst aufgrund des veränderten Durchfeuchtungs- / Abtrocknungsverhaltens der behandelten Mauerwerke sogar zur vermehrten Salzbildung und augenscheinlich zu höherer Durchfeuchtung kommt. Das bedeutet, dass im direkten Nachgang zu den Injektionsarbeiten der Abdichtungserfolg zunächst durch Augenscheinnahme allein nicht erkennbar ist. Der sichtbare Abdichtungserfolg einer Injektionsmittelabdichtung stellt sich erst nach geraumer Zeit ein. Bisher eingesetzte Nachweisverfahren setzen auf die Langzeitmessung von mit Injektionsmitteln behandelten Mauerwerken oder Laborproben. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich zu bejahen. Diese Art der Überprüfung entspricht jedoch nicht den baupraktischen Anforderungen, da die Laufzeit der bisher bekannten Nachweisverfahren deutlich zu lang bemessen ist.

Es bedarf daher eines Nachweisverfahrens, dass sowohl qualitätsüberwachend (baubegleitend), als auch zur Überprüfung der Wirksamkeit des Injektionsmitteleinsatzes im Nachgang zu den Arbeiten eingesetzt werden kann. Dieses Nachweisverfahren muss unabhängig von der Durchfeuchtung des Mauerwerks und unabhängig von der Versalzung eingesetzt werden können. Zudem muss das Verfahren schnelle, reproduzierbare und objektivierbare Ergebnisse liefern können.

5.1.3 **These 3:** Anhand von rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen im ESEM können Betaungsvorgänge an Baustoffen im mikroskopischen Maßstab in situ erzeugt werden. Diese geben Aufschluss über die Kapillarität des untersuchten Baustoffs.

Die Betaungsvorgänge im ESEM folgen denselben physikalischen Grundsätzen, wie solche im makroskopischen Bereich. Die Untersuchung mit dem ESEM bietet jedoch Vorteile gegenüber den makroskopischen Verfahren. Insbesondere bei der Kontaktwinkelmessung bietet der Einsatz des ESEM deutliche Vorteile, da Betaungen als dynamische Vorgänge beobachtet werden können. Anhand der Betaung im ESEM kann die Kapillarität mittels geometrischer Tropfen- Kontur- Analyse-Verfahren, oder mittels softwaregestützter Kontaktwinkelauswertung sehr exakt bestimmt werden. Der Einsatz des ESEM zur Betaung ist bereits vielfach in anderen Disziplinen untersucht und belegt. Dennoch wird das ESEM derzeit in der Bau- Materialforschung noch nicht in dem Maß eingesetzt, wie in anderen Disziplinen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses durch neue Untersuchungen in Kürze ändern wird. Das ESEM wird bereits erfolgreich zu Untersuchungen im Bereich der Altertumforschung und zur Untersuchung von Fassaden eingesetzt.

5.1.4 **These 4:** Anhand von mikroskopischen Analysen im ESEM, kann an kapillaren Baustoffen, die mit Injektionsmitteln behandelt wurden, deren veränderte Kapillarität nachgewiesen werden. Das Nachweisverfahren eignet sich zur baupraktischen Anwendung.

Der Nachweis der veränderten Kapillarität im Vergleich zu unveränderten Bereichen (Referenzproben) im ESEM führt zu exakten Aussagen über die tatsächliche Wirkweise und Ausbreitung eines Injektionsmittels. Das mikroskopische Verfahren im ESEM erlaubt eine exakte Bestimmung der Kontaktwinkel. Auf diese Weise kann die Wirksamkeit des Injektionsmittels dargelegt werden. In dieser Arbeit werden die Untersuchungen im ESEM in Verbindung mit REM- Untersuchungen durchgeführt:

- Mikroskopische Überprüfung des Hydrophobierungsfilms im REM
- Bestimmung der Kontaktwinkel durch Betaungen im ESEM

Bei geeigneter Probenanordnung am Mauerwerk kann ein geometrisches Bild der veränderten Kapillarität wiedergegeben werden. Im ESEM können sowohl statische, als auch dynamische Kontaktwinkel gemessen werden. Es kann mit geringem Probenmaterial in sehr kurzer Zeit gearbeitet werden. Insofern eignet sich das hier vorgestellte neue Nachweisverfahren für den baupraktischen Einsatz zur baubegleitenden und abschließenden Überprüfung der Injektions- Arbeiten.

6. 2- STUFIGE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG ZIEGEL / MÖRTEL

6.1 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

In dieser Arbeit wurde anhand von Ziegel-, Mörtel- und Mauerwerksproben im ersten Schritt (Stufe 1) die Datengrundlage für die ESEM- Untersuchungen geschaffen. Im zweiten Schritt (Stufe 2) wurden REM- und ESEM- Untersuchungen durchgeführt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche gliedern sich daher in 2 Stufen:

- Proben- Pool mit 122 Einzelproben [Stufe 1], siehe Abbildung 46
 - Stufe 1a: Untersuchungen unter Einsatz von Sonden-Messungen und Datenlogger, zur Probengewinnung für das Nachweisverfahren in Stufe 2
- REM- und ESEM- Untersuchungen [Stufe 2]

6.2 Versuchsanordnung Stufe 1

6.2.1 Proben- Pool mit 122 Proben

| M Mörtel | | | | Art | Bohrung [mm] | Anzahl |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| IM 1_M | IM 2_DL_M / IM 2_D_M | IM 3_M | | Mörtelwürfel | 14 mm | 8 2 16 |
| 1 MG IIa | 1 MG IIa | 1 MG IIa | | Mörtelwürfel | 16 mm | 4 2 8 |
| 4 D(g) | 4 D(g) | 4 D(g) | | Mörtelwürfel | 25 mm | 4 2 8 |
| 1 IM 1 | 1 IM 2 | 1 IM 3 | | Mörtelwürfel | Referenz | 1 2 2 |
| 4 Proben 1 ohne Druck | 4 Proben 2 mit und ohne Druck | 4 Proben 1 ohne Druck | | | | |
| 4 | 8 | 4 | 16 Proben mit IM 1 Leerproben | | | 17 2 34 Stk |
| | | | M_Mörtel | | | 17 GESAMT |
| Z Ziegel 2,0 ZDF neu | | | | Art | Bohrung [mm] | Anzahl |
| IM 1_Z | IM 2_DL_Z / IM 2_D_Z | IM 3_Z | | Ziegel neu | 14 mm | 8 2 16 |
| 1 Ziegel 2,0 | 1 Ziegel 2,0 | 1 Ziegel 2,0 | | Ziegel neu | 16 mm | 4 2 8 |
| 4 D(g) | 4 D(g) | 4 D(g) | | Ziegel neu | 25 mm | 4 2 8 |
| 1 IM 1 | 1 IM 2 | 1 IM 3 | | Ziegel neu | Referenz | 1 2 2 |
| 4 Proben 1 ohne Druck | 4 Proben 2 mit und ohne Druck | 4 Proben 1 ohne Druck | | | | |
| 4 | 8 | 4 | 16 Proben mit IM 1 Leerproben | | | 17 2 34 Stk |
| | | | Z_Ziegel 2,0 | | | 17 GESAMT |
| A Ziegel Althaus | | | | Art | Bohrung [mm] | Anzahl |
| IM 1_A | IM 2_DL_A / IM 2_D_A | IM 3_A | | Ziegel Althaus | 14 mm | 8 2 16 |
| 1 Ziegel Althaus | 1 Ziegel Althaus | 1 Ziegel Althaus | | Ziegel Althaus | 16 mm | 4 2 8 |
| 4 D(g) | 4 D(g) | 4 D(g) | | Ziegel Althaus | 25 mm | 4 2 8 |
| 1 IM 1 | 1 IM 2 | 1 IM 3 | | Ziegel Althaus | Referenz | 1 2 2 |
| 4 Proben 1 ohne Druck | 4 Proben 2 mit und ohne Druck | 4 Proben 1 ohne Druck | | | | |
| 4 | 8 | 4 | 16 Proben mit IM 1 Leerproben | | | 17 2 34 Stk |
| | | | A_Ziegel Althaus | | | 17 GESAMT |
| V Ziegel Verbund | | | | Art | Bohrung [mm] | Anzahl |
| IM 2_DL_V | | | | Ziegel Verbund | 14 mm | 4 0 0 |
| 1 Ziegel Verbund | | | | Ziegel Verbund | 25 mm | 8 2 16 |
| 4 D(g) | | | | Ziegel Althaus | Referenz | 2 2 4 |
| 1 IM 2 | | | | | | |
| 4 Proben 2 ohne Druck | | | | | | |
| 8 Proben mit IM 2 Leerproben | | | 10 | | | 10 2 20 Stk |
| | | | Ziegel Verbund | | | 10 GESAMT |
| * IM = Injektionsmittel | | | | | | Σ Proben gesamt Stk 122 |

Abbildung 46: Probenpool für Stufe 1, bestehend aus 122 Ziegel-, Mörtel- und Mauerwerksproben, Quelle: Körber P. [ANLAGE 01]

6.2.1.1 Injektions- Versuch mit Ziegeln, Mörtel und Mauerwerken

In der hiesigen Arbeit wurde in Stufe 1 für alle Mauerziegel-, die Mauermörtel- und die Mauerwerks-Proben die gleiche Versuchsanordnung zu Grunde gelegt. Als Versuchsmaterialien wurden handelsübliche Mauervollziegel im Format 2DF (Z) und handelsüblicher Mauermörtel der Mörtelgruppe MG IIa (M) gewählt. Die Althaus- Proben (A und V) bestehen aus etwa 100 Jahre alten Althaus- Ziegeln, die aus einem Abbruch gewonnen worden sind. Es wurden sowohl einzelne Ziegel (A) als auch Mauerwerksteile (V) mit völlig intaktem Verbund eingesetzt. Die Verbund- Mauerwerksstücke (V) wurden auf eine Größe von etwa $l/h/t = 38/38/25$ cm zugeschnitten. Der Mauermörtel (M) wurde an Probekörpern mit den Abmessungen $l/b/h = 15/15/15$ cm geprüft. Die Mörtel- Probekörper (M) wurden mittels System-schalung hergestellt. Die Mörtel- Probekörper hatten bei Beginn der Injektionsarbeiten ihre Nennfestigkeit (nach 28 Tagen) bereits erreicht. Die Herstellung und Lagerung der Mörtel- Probekörper erfolgte gemäß den Verarbeitungsrichtlinien des Mörtel- Herstellers. Für die Durchführung der Injektionen wurden 3 einschlägige Hersteller von hydrophobierenden und verengenden Injektionsmitteln mit einer hohen Marktpräsenz gewählt. Um das Injektionsmittel- Verhalten unter Einfluss verschiedener Durchfeuchtungsgrade ($D_{(g)}$) beobachten und messen zu können, wurden die Probekörper auf die Durchfeuchtungsgrade $D_{(g)}$: 30%, 50%, 70% und 90% eingestellt. Die Injektionen mit IM 2 wurden zum einen drucklos und zum anderen unter Druck (5 bar) durchgeführt. Auch hier wurden für die Mörtel- und die Ziegel- Probekörper gleiche Bedingungen gewählt. Die beiden anderen eingesetzten Injektionsmittel wurden im Kapillar- und im Schwerkraftverfahren drucklos appliziert. Zusammenfassung der Versuchsanordnungen (Mörtel-, Ziegel-, Mauerwerk- Verbund -Proben):

- 4 unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade $D_{(g)}$: 30%, 50%, 70% und 90%
 - 3 unterschiedliche Injektionsmittel: Cavastop (IM1), Kiesol (IM2) und Köster C76 (IM3)
 - 4 Versuchsreihen: Prüfung von 4 verschiedenen Ziegeln/Mörteln:
 - M => Mörtel, MG IIa, $l/b/h = 15/15/15$ cm [ANLAGE 20 a - c]
 - Z => Ziegel neu, RD = 2,0*, 2 x Dünnformat: $b/h/t = 24/11,3/11,5$ cm
 - A => Ziegel Althaus, RD = 1,6*, Normalformat: $b/h/t = 24/7,1/11,5$ cm
 - V => Ziegel- / Mörtel- Verbund Althaus, Ziegel RD = 1,6*, $l/h/t = \sim 38/38/25$ cm
 - 2 Injektionsvarianten bei IM 2: drucklos (IM 2_DL) und unter Druck (IM 2_D) [ANLAGE 21]
 - 122 Mörtel- und Ziel Proben insgesamt
- * =Rohdichte [kg/dm^3]

Während die Proben M und Z als ‚neu‘ zu bezeichnet werden können, sind die Proben A und Z bereits karbonatisierte Althausproben. Auf diese Weise können Beobachtungen an ‚Bestands- Bauteilen‘ simuliert werden. Bei der Auswahl der Verbundmauerwerke (V) wurde sowohl darauf geachtet, dass der Verbund gegeben und das Fugennetz intakt ist, als auch dass keine Versalzung vorliegt. Bei den Althaus- Ziegeln (A) wurde sichergestellt, dass weder Frost- noch Salzschäden vorliegen.

6.2.1.2 Chemismus und Technische Daten der Injektionsmittel

Nachfolgend sind für die vorliegend verwendeten Injektionsmittel, der Chemismus, die Wirkweise und die Inhaltsstoffe in Tabelle 4 aufgeführt. Die Angaben sind den technischen Merkblättern der Hersteller entnommen (siehe Anhang).

CAVASTOP (IM 1)* [135], [ANLAGE 24]

Cavastop ist ein dünnflüssiger Kunstharzkautschuk mit aromafreien Lösemitteln und einer geringen Dichte. Eigenschaften von Cavastop:

- Hydrophobierend und porenverengend
- Schutz gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit durch Injektionen im Bohrlochverfahren
- Dichte im Anlieferungszustand: 0,81 g/cm^3
- Viskosität im Anlieferungszustand: 1,4 $\text{mPa}\cdot\text{s}$
- Einsetzbarkeit bei druckloser Injektion $D_{(g)}$ bis zu 85%.
- Injektion erfolgt drucklos im Kartuschenverfahren: Schwerkraftprinzip
- Bohrungen 25°- 50°: d = 16 mm
- Reaktionszeit: 6-12 Wochen

*Angaben der Injektionsmittelhersteller

Kiesol, Remmers (IM 2)* [136], [ANLAGE 22 a – d]

Kiesol ist ein flüssiges Kombinationsprodukt aus wasserabweisenden Kieselsäureverbindungen.

Eigenschaften von Kiesol:

- Hydrophobierend und porenverengend
- Schutz gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit durch Injektionen im Bohrlochverfahren
- Dichte im Anlieferungszustand nach DIN 51757: 1,15 g/cm³
- pH-Wert im Anlieferungszustand: 11
- Wasserdampfdurchlässigkeit nach Aushärtung: > 90 %
- Wasserabweisung nach Aushärtung: $w < 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$
- Verfestigung nach Aushärtung: bis 5 N/mm²
- Einsetzbarkeit bei druckloser Injektion: D_(g) bis zu 80%
- Injektion erfolgt drucklos über Vorratsgefäße: Schwerkraftprinzip
- Injektion im Niederdruckverfahren: Pumpendruck 4-8 bar
- Bohrungen 25°: d = 10-30 mm

KÖSTER Crisin 76 (IM 3) * [137], [138], [ANLAGE 23 a, b]

Crisin 76 Konzentrat ist ein dünnflüssiges, konzentriertes, lösemittelfreies Kunstharz mit geringer Dichte. Eigenschaften von Crisin 76:

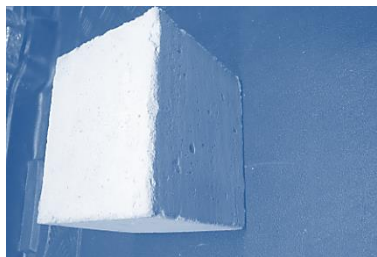
- Hydrophobierend und porenverengend
- Schutz gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit durch Injektionen im Bohrlochverfahren
- Dichte im Anlieferungszustand: 0,91 g/cm³
- Viskosität im Anlieferungszustand: 10-15 mPa•s
- Wirkstoffgehalt: 70 %
- Einsetzbarkeit bei druckloser Injektion: D_(g) bis zu 95%.
- Injektion erfolgt drucklos mit Kapillarstäbchen und Saugwinkel: Kapillarprinzip
- Bohrungen horizontal: d = 14 mm

Tabelle 4: Auflistung von Daten zum Chemismus, der Wirkweise und zu den Inhaltsstoffen der hier verwendeten Injektionsmittel, Quelle: Technische Merkblätter der Hersteller, siehe Anhang

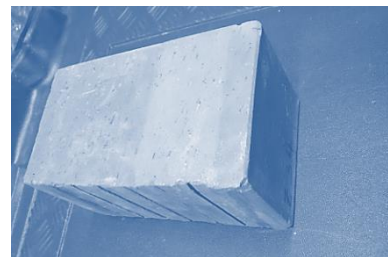
6.2.1.3 Fotos zum Versuchsaufbau Stufe 1



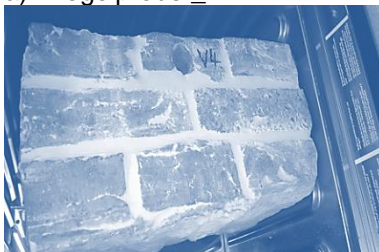
a) Ziegelprobe _ A



b) Mörtelprobe _ M



c) Ziegelprobe _ Z



d) Verbundprobe _ V



e) Verbundproben _ V



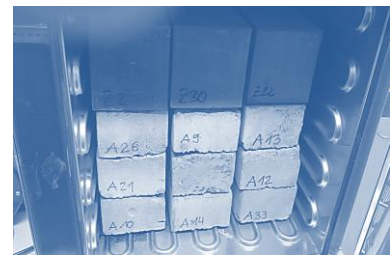
f) Mörtelproben _ M



g) Einstellung $D_{(q)}$



h) Lagerung, $D_{(q)}$ eingestellt



i) Trocknung im Laborofen



j) Lagerung, $D_{(q)}$ eingestellt



k) Injektionen Cava, C76



l) Proben mit Injektion



m) Packer (Niederdruck)



n) Verwendete Kolbenpumpe



o) Probengewinnung
(Mini-Kernbohrung)

Abbildung 47: a) bis o): Fotos vom Versuchsaufbau des hiesigen Injektionsmittelversuchs
an 122 Proben im Labor, Quelle: Körber P. [ANLAGE 02]

Die Versuchsanordnung in Stufe 1 diente der Messdatenerfassung für die Durchführung der konventionellen, makroskopischen Nachweis- Messungen. Diese Mess- Daten wurden im Nachgang in Stufe 2 mit den mikroskopischen Messdaten aus dem ESEM korreliert. In Stufe 1 wurden ausschließlich makroskopische Messdaten an den, mit Injektionsmitteln versehenen Proben, erfasst.

6.2.1.4 Beschreibung Versuch Stufe 1

Nach Abschluss der Injektionen und deren Ausreagieren im Baustoff wurden alle 122 Proben mittig in Achse des Bohrschaftes aufgespalten/aufgetrennt. An der so frei gelegten Injektionsebene wurden quer zur Schnittebene Mini-Kernbohrungen entnommen. An den so gewonnenen und getrockneten Proben wurden jeweils 3 konventionelle Messungen durchgeführt:

- Makroskopische Bestimmung des w -Wertes [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{t}$]
- Makroskopische Bestimmung des Kontaktwinkels [$^\circ$] im Drop-Shape- Analyser
- Messung der Ausbreitung des Injektionsmittels [mm]

Der Versuchsdurchgang in Stufe 1a gehört ebenfalls zu den makroskopischen Messungen, welche in Vorbereitung auf die Stufe 2 durchgeführt worden sind. In Stufe 1a wurde folgende Messungen durchgeführt:

- Bestimmung der RH- Werte* inmitten von ausgewählten Proben mittels Klimasensoren, die in versiegelte Bohrlöcher eingesetzt worden sind
- *RH = Relative Humidity (Relative Luftfeuchte) in Messkammern in Probenmitte

6.3 Versuchsanordnung Stufe 1a

6.3.1.1 Messung der Relativen Feuchte in definierten Messkammern im Probeninneren mittels Datenlogger

Für den Versuchsdurchgang der Stufe 1a wurde aus dem Probenpool eine Auswahl an Proben getroffen, an denen bereits im Versuchsdurchgang der Stufe 1 Injektionsmittel appliziert worden waren. Diese Auswahl besteht sowohl aus einzelnen Ziegeln, als auch aus Verbund- Ziegelmauerwerk. Es wurde folgende Auswahl aus dem Probenpool getroffen:

- | | | | |
|-------|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| • Z29 | => Ziegel neu RD 2,0, 2DF | =>30% $D_{(g)}$ | =>IM 3 |
| • A27 | => Ziegel Althaus, RD 1,6, NF | =>70% $D_{(g)}$ | =>IM 3 |
| • A12 | => Ziegel Althaus, RD 1,6, NF | =>90% $D_{(g)}$ | =>IM 2_DL |
| • V5 | => Z.- / M.- Verbund Althaus, RD 1,6 | =>30% $D_{(g)}$ | =>IM 2_DL |
| • V1 | => Z.- / M.- Verbund Althaus, RD 1,6 | =>30% $D_{(g)}$ | =>IM 2_DL |

Diese Proben wurden zunächst darr- getrocknet und mittels Bohrungen für die Sonden- Messungen vorbereitet. Es wurden mindestens 4 Bohrungen je Probe eingebracht. Diese Bohrungen wurden jeweils sowohl innerhalb der Injektionsebenen, als auch außerhalb dieser Ebenen angeordnet. In die vorbereiteten Bohrungen wurden Mess- Sonden derart eingeklebt und luftdicht verschlossen, dass sich die Sonden im Messbereich (inmitten der Probe) jeweils in einer Messkammer mit einer Größe von ~ 8 * 10 mm befanden. In den Messkammern befand sich der jeweilige Messkopf der Sonde im freien, luftumspülten Raum. Die Messköpfe haben parallel mindestens 4-fach die sich unter dem Versuch in der jeweiligen Messkammer verändernde Relative Luftfeuchte (=RH) erfasst. Die Daten wurden mittels Logger fortlaufend bis zur Messkonstanz geschrieben. In der Skizze in Abbildung 48 ist die Versuchsanordnung schematisch an einem Verbund- Mauerwerks- Prüfkörper dargestellt [139].

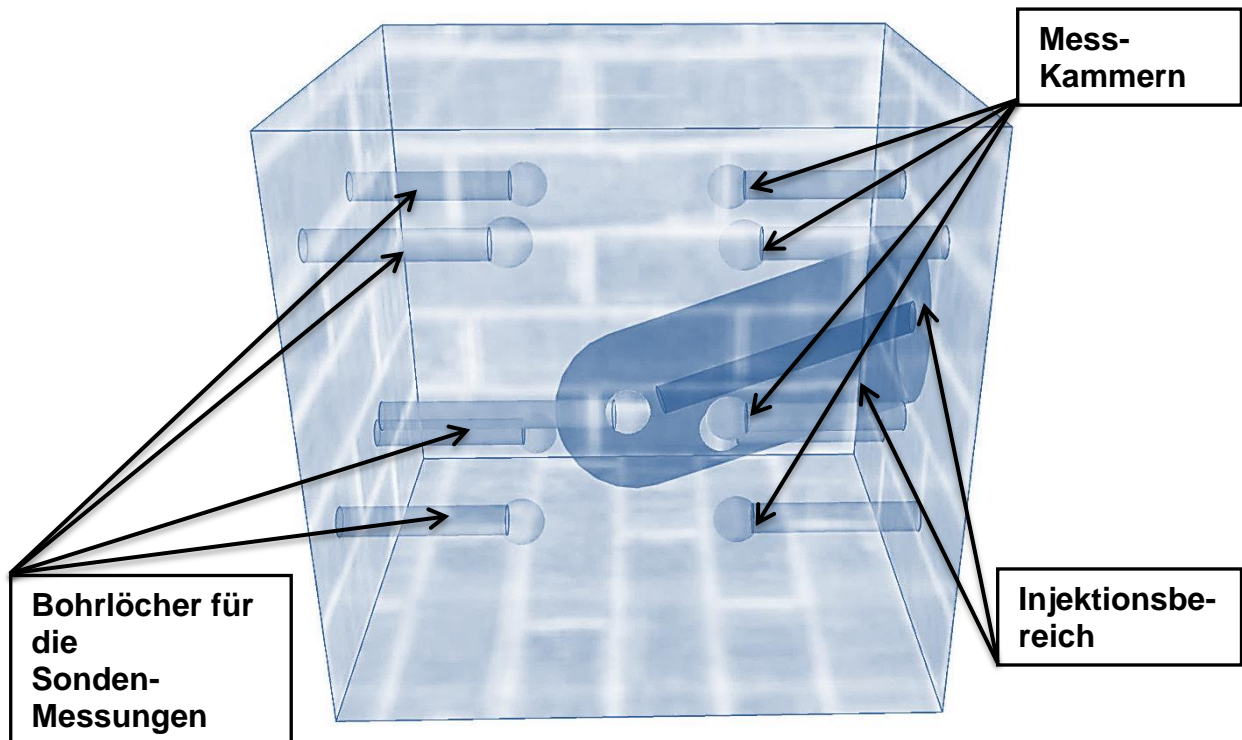


Abbildung 48: Versuchsanordnung Stufe 1a: => Systematische, skizzenhafte Erläuterung, Quelle Körber

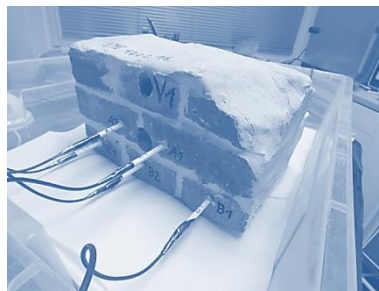
Die Proben wurden zum Versuchsdurchlauf in ein Wasserbad gestellt, sodass eine Wasseraufnahme der jeweiligen Probe über kapillares Saugen erfolgte. In den Bildern der Abbildung 49 kann der Versuchsaufbau der Stufe 1a exemplarisch nachvollzogen werden.

Anhand der kontinuierlichen Datenlogger- Messungen wurden die relativen Luftfeuchten in den Messkammern bis zur Messkonstanz erfasst. Diese Daten geben ebenso, wie die in Stufe 1 erfassten makroskopischen Messdaten, Aufschluss über die Wasseraufnahme der Proben. Im nächsten Schritt wurden mittels Mini- Kernbohrungen Materialproben aus den Bereichen, die in direkter Nähe zu den jeweiligen Messkammern lagen, entnommen, siehe Abbildung 50. Diese Proben sind das in den Datenlogger- Messungen untersuchte Material der jeweiligen Proben, welches sich an definierten Bereichen inmitten der Proben befand. Das auf diese Weise gewonnenen Probenmaterial wurde in Stufe 2 im REM auf den Hydrophobierungsfilm und im ESEM mittels Betaung untersucht. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da sie den Arbeitsschritten des hier beschriebenen Nachweisverfahrens entspricht. Im Rahmen der Untersuchungen in Stufe 2 lag die Priorität darin, die jeweils veränderte oder unveränderte Kapillarität inmitten des Mauerwerks nachweisen zu können. Im Ergebnis müssen die gewonnenen Messergebnisse mit der jeweiligen Referenzprobe verglichen werden.

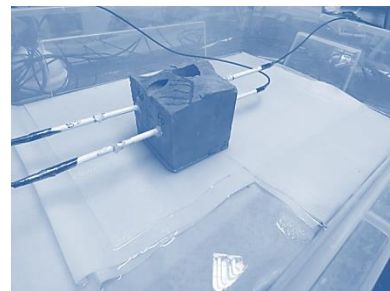
6.3.1.2 Fotos zum Versuchsaufbau Stufe 1a



a) Probe V5



b) Probe V1



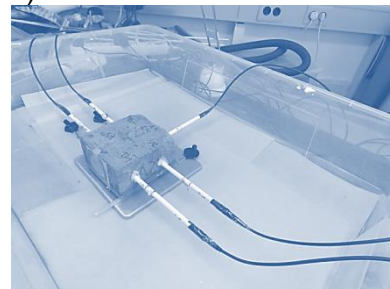
c) Probe Z29



d) Messeinrichtung



e) Datenlogger



f) Probe A27

Abbildung 49: a) bis f): Fotos vom Versuchsaufbau in Stufe 1a im Labor, Quelle: Körber P [ANLAGE 03]

6.3.1.3 Beschreibung Versuch Stufe 1a

Die Versuchsanordnung Stufe 1a wurde zur Verifikation des in dieser Arbeit beschriebenen ESEM-Nachweis- Verfahrens durchgeführt. Es wurden in Stufe 1a bewusst sowohl Untersuchungsbereiche innerhalb der jeweiligen Injektionsebene, als auch solche gewählt, die außerhalb einer Injektionsebene liegen. Auf diese Weise konnte die Gebrauchstauglichkeit des Verfahrens belegt und sichergestellt werden. Ein wesentlicher Ansatz bei dem hier vorgestellten Nachweisverfahren ist die Möglichkeit, die Wirksamkeit eines Injektionsmittels am Objekt überprüfen zu können. Darüber hinaus soll differenziert werden können, bis zu welchem Grad eine veränderte Kapillarität tatsächlich vorliegt. Zudem soll die

Möglichkeit bestehen, Mauerwerke an unzugänglichen Stellen (in der Tiefe der Wand) untersuchen zu können, um auf diese Weise ein geometrisches Bild der veränderten Kapillarität abbilden zu können. Die Datenlogger- Messergebnisse der Stufe 1a dienen der Verbreiterung der Datenbasis und der Korrelation zwischen makroskopischen und mikroskopischen Daten. Mit den Ergebnissen der Datenlogger- Messungen soll zum einen die Überprüfung der übrigen Messergebnisse im Sinne einer Gegenprüfung möglich sein. Zum anderen sollen diese Ergebnisse zusammen mit den fiktiven Wassergehalten (gewonnen aus den w-Wert- Messungen) die Datengrundlage für eine rechnergestützte (fiktive) Feuchtesimulation darstellen.

Nachdem die Datenlogger- Messungen in Stufe 1a bis zur Messkonstanz erfolgt sind, wurden mittels Mini- Kernbohrungen das, den Messkammern unmittelbar anliegende Probenmaterial (in der Tiefe der Proben), entnommen. Die so an den Messkammern gewonnenen Proben wurden in Stufe 2 im ESEM einer Betaung unterzogen und es wurden die entstehenden ESEM- Kontaktwinkel erfasst. Im letzten Schritt wurden die, am unmittelbar neben den Messkammern entnommenen Material, geprüften ESEM- Kontaktwinkel mit Hilfe der in Stufe 1 gewonnenen makroskopischen Daten korreliert. Die auf Basis der Daten aus Stufe 1 und Stufe 2 durchgeführte rechnerische Modellierung erlaubt es, den gemessenen ESEM- Kontaktwinkeln w-Werte und fiktive Wassergehalte zuzuordnen. Auf diese Weise kann man sich mit dem hier vorgestellten Verfahren ein qualitatives, quantitatives und geometrisches Bild über die veränderte Kapillarität, des mit Injektionsmitteln behandelten Mauerwerks, verschaffen. Zudem kann mithilfe der Daten eine Simulation der Mauerwerkswand zur Untersuchung einer fiktiven Durchfeuchtung durchgeführt werden. Die über das rechnerische Modell ermittelten w-Werte werden nach der Matrix aus Abbildung 35 ausgewertet und mit den unbehandelten Referenzproben verglichen. Insofern wird bezüglich der w-Wert- Messungen und deren Auswertung in der Analogie zu bereits bestehenden und in dieser Arbeit beschriebenen und diskutierten Verfahren gearbeitet, wobei diese Verfahren hier weiterentwickelt werden. Die durch die Injektion tatsächlich veränderte Kapillarität des untersuchten Mauerwerks kann in einem geometrischen Modell abgebildet und somit auch quantitativ nachgewiesen werden.

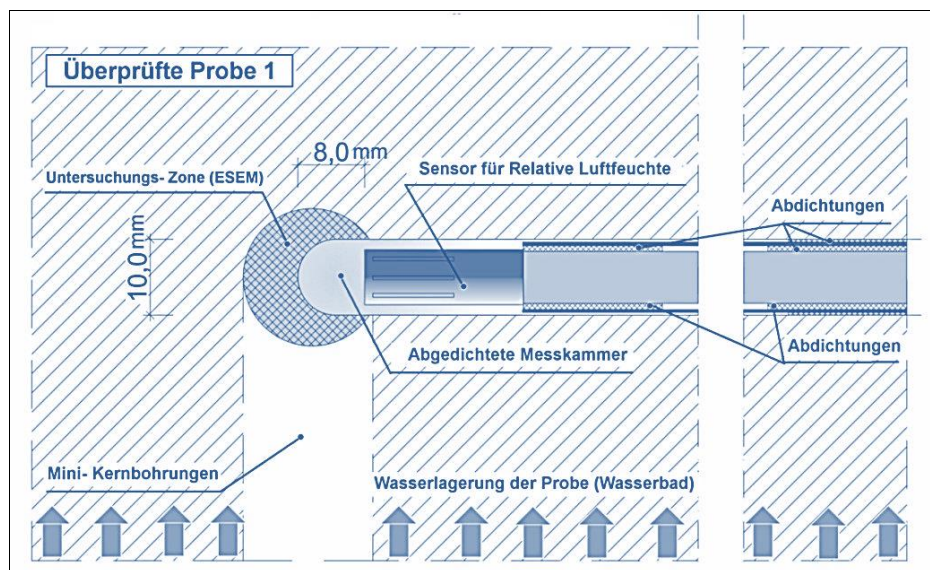


Abbildung 50: Detailskizze zur Versuchsdurchführung in Stufe 1a:

Das in der Untersuchungszone neben der Messkammer entnommene Material wurde im ESEM mittels Betaung untersucht, Quelle: Körber P. [ANLAGE 04]

Das hier vorgestellte ESEM- Nachweisverfahren eignet sich sowohl zur baubegleitenden Qualitätsüberwachung als auch zur Nachweisführung der Wirksamkeit der Injektionsmittel- Abdichtung. Der baupraktische Nutzen besteht darin, dass sofort nach dem Ausreagieren des Injektionsmittels, Proben in großer Zahl minimalinvasiv und tiefengestaffelt aus dem zu untersuchenden Mauerwerk entnommen werden können. Auf Grund der geringen Probengröße können diese Proben problemlos versendet werden und mit einer kurzen Untersuchungszeit im Labor mittels ESEM auf ihre Kapillarität hin, sehr präzise überprüft werden.

7. ERGEBNISSE VERSUCH STUFE 1

7.1 Ergebnisse an mit Injektionsmitteln behandelten Proben

| MÖRTEL neu | | | | | | Ziegel 2,0 2DF neu | | | | | |
|------------|---------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| M | Proben MÖRTEL | D(g) [%] | W-Wert [kg/m ² vt] | Kontakt-Winkel [°] makroskopisch | Injektionsmittel-Ausbreitung [mm] | Z | Proben Ziegel neu | D(g) [%] | W-Wert [kg/m ² vt] | Kontakt-Winkel [°] makroskopisch | Injektionsmittel-Ausbreitung [mm] |
| IM 1 | M1 | 30 | 0,22 | 100 | 100 | IM 1 | Z1 | 30 | 0,04 | 116 | 100 |
| IM 1 | M2 | 50 | 0,30 | 95 | 100 | IM 1 | Z2 | 50 | 0,07 | 111 | 100 |
| IM 1 | M3 | 70 | 0,17 | 103 | 100 | IM 1 | Z3 | 70 | 0,10 | 108 | 100 |
| IM 1 | M4 | 90 | 0,33 | 90 | 100 | IM 1 | Z4 | 90 | 0,06 | 112 | 100 |
| IM 1 | M5 | 30 | 0,13 | 112 | 100 | IM 1 | Z5 | 30 | 0,06 | 112 | 100 |
| IM 1 | M6 | 50 | 0,15 | 109 | 100 | IM 1 | Z6 | 50 | 0,06 | 112 | 100 |
| IM 1 | M7 | 70 | 0,41 | 88 | 100 | IM 1 | Z7 | 70 | 0,05 | 113 | 100 |
| IM 1 | M8 | 90 | 0,46 | 84 | 100 | IM 1 | Z8 | 90 | 0,08 | 110 | 100 |
| IM 2_DL | M9 | 30 | 0,33 | 95 | 100 | IM 2_DL | Z9 | 30 | 0,08 | 108 | 100 |
| IM 2_DL | M10 | 50 | 0,39 | 92 | 100 | IM 2_DL | Z10 | 50 | 0,07 | 110 | 100 |
| IM 2_DL | M11 | 70 | 0,87 | 50 | 100 | IM 2_DL | Z11 | 70 | 0,12 | 105 | 100 |
| IM 2_DL | M12 | 90 | 0,33 | 95 | 100 | IM 2_DL | Z12 | 90 | 0,18 | 95 | 100 |
| IM 2_DL | M13 | 30 | 0,17 | 103 | 20 | IM 2_DL | Z13 | 30 | 0,05 | 113 | 100 |
| IM 2_DL | M14 | 50 | 0,13 | 115 | 20 | IM 2_DL | Z14 | 50 | 0,16 | 99 | 100 |
| IM 2_DL | M15 | 70 | 0,43 | 85 | 20 | IM 2_DL | Z15 | 70 | 0,09 | 106 | 100 |
| IM 2_DL | M16 | 90 | 0,33 | 95 | 20 | IM 2_DL | Z16 | 90 | 0,09 | 105 | 100 |
| IM 2_D | M17 | 30 | 0,45 | 88 | 100 | IM 2_D | Z17 | 30 | 0,11 | 100 | 100 |
| IM 2_D | M18 | 50 | 0,45 | 88 | 100 | IM 2_D | Z18 | 50 | 0,09 | 106 | 100 |
| IM 2_D | M19 | 70 | 0,39 | 92 | 100 | IM 2_D | Z19 | 70 | 0,07 | 110 | 100 |
| IM 2_D | M20 | 90 | 0,30 | 95 | 100 | IM 2_D | Z20 | 90 | 0,07 | 110 | 100 |
| IM 2_D | M21 | 30 | 0,78 | 48 | 100 | IM 2_D | Z21 | 30 | 0,11 | 99 | 100 |
| IM 2_D | M22 | 50 | 0,48 | 85 | 100 | IM 2_D | Z22 | 50 | 0,14 | 90 | 100 |
| IM 2_D | M23 | 70 | 0,33 | 95 | 100 | IM 2_D | Z23 | 70 | 0,07 | 110 | 100 |
| IM 2_D | M24 | 90 | 0,26 | 105 | 100 | IM 2_D | Z24 | 90 | 0,09 | 106 | 100 |
| IM 3 | M25 | 30 | 0,41 | 90 | 100 | IM 3 | Z25 | 30 | 0,56 | 66 | 0 |
| IM 3 | M26 | 50 | 0,24 | 99 | 100 | IM 3 | Z26 | 50 | 0,12 | 95 | 45 |
| IM 3 | M27 | 70 | 0,14 | 110 | 100 | IM 3 | Z27 | 70 | 0,49 | 70 | 0 |
| IM 3 | M28 | 90 | 0,20 | 107 | 100 | IM 3 | Z28 | 90 | 0,12 | 95 | 50 |
| IM 3 | M29 | 30 | 0,22 | 103 | 100 | IM 3 | Z29 | 30 | 0,05 | 113 | 50 |
| IM 3 | M30 | 50 | 0,13 | 115 | 100 | IM 3 | Z30 | 50 | 0,76 | 15 | 0 |
| IM 3 | M31 | 70 | 0,26 | 105 | 100 | IM 3 | Z31 | 70 | 0,67 | 43 | 0 |
| IM 3 | M32 | 90 | 0,17 | 108 | 100 | IM 3 | Z32 | 90 | 0,11 | 100 | 66 |
| IM 3 | M33 | 30 | 0,15 | 109 | 100 | IM 3 | Z33_A | 30 | 0,05 | 115 | 50 |
| | | | | | | IM 3 | Z33_B | 30 | 0,06 | 114 | 50 |

Tabelle 5: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 1, Quelle Körper P. [ANLAGE 05a]

| Ziegel Althaus | | | | | | VERBUND Ziegel/Mörtel ALTHAUS | | | | |
|----------------|-----------------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|
| A | Proben Ziegel Althaus | D(g) [%] | W-Wert [kg/m ² vt] | Kontakt-Winkel [°] makroskopisch | Injektionsmittel-Ausbreitung [mm] | V | Proben Verbund Althaus | D(g) [%] | W-Wert [kg/m ² vt] | Kontakt-Winkel [°] makroskopisch |
| IM 1 | A1 | 30 | 0,22 | 120 | 100 | IM 2_DL | V1_A | 30 | 0,08 | 108 |
| IM 1 | A2 | 50 | 0,82 | 60 | 100 | IM 2_DL | V1_B | 30 | 0,13 | 105 |
| IM 1 | A3 | 70 | 0,82 | 62 | 100 | IM 2_DL | V1_C | 30 | 0,19 | 101 |
| IM 1 | A4 | 90 | 0,21 | 120 | 100 | IM 2_DL | V2_A | 50 | 0,19 | 100 |
| IM 1 | A5 | 30 | 0,27 | 115 | 100 | IM 2_DL | V2_B | 50 | 0,45 | 88 |
| IM 1 | A6 | 50 | 0,27 | 115 | 100 | IM 2_DL | V2_B | 50 | 0,68 | 76 |
| IM 1 | A7 | 70 | 0,18 | 122 | 100 | IM 2_DL | V3_A | 70 | 0,33 | 95 |
| IM 1 | A8 | 90 | 1,14 | 30 | 100 | IM 2_DL | V3_B | 70 | 1,49 | 35 |
| IM 2_DL | A9 | 30 | 0,24 | 118 | 100 | IM 2_DL | V4_A | 90 | 0,24 | 99 |
| IM 2_DL | A10 | 50 | 0,20 | 121 | 100 | IM 2_DL | V4_B | 90 | 1,52 | 37 |
| IM 2_DL | A11 | 70 | 0,27 | 116 | 100 | IM 2_DL | V5 | 30 | 0,07 | 108 |
| IM 2_DL | A12 | 90 | 0,28 | 115 | 100 | IM 2_DL | V6_A | 50 | 0,37 | 93 |
| IM 2_DL | A13 | 30 | 0,27 | 116 | 100 | IM 2_DL | V6_B | 50 | 0,36 | 95 |
| IM 2_DL | A14 | 50 | 0,35 | 105 | 100 | IM 2_DL | V6_C | 50 | 0,23 | 100 |
| IM 2_DL | A15 | 70 | 0,29 | 110 | 100 | IM 2_DL | V6_D | 50 | 0,79 | 72 |
| IM 2_DL | A16 | 90 | 0,27 | 116 | 100 | IM 2_DL | V6_E | 50 | 0,84 | 68 |
| IM 2_D | A17 | 30 | 0,26 | 118 | 100 | IM 2_DL | V7 | 70 | 0,14 | 110 |
| IM 2_D | A18 | 50 | 0,16 | 123 | 100 | IM 2_DL | V8_A | 90 | 0,19 | 102 |
| IM 2_D | A19 | 70 | 0,25 | 117 | 100 | IM 2_DL | V8_B | 90 | 0,20 | 100 |
| IM 2_D | A20 | 90 | 0,24 | 118 | 100 | IM 2_DL | V8_C | 90 | 0,68 | 77 |
| IM 2_D | A21 | 30 | 0,27 | 115 | 100 | IM 2_DL | V9 | 90 | 1,89 | 15 |
| IM 2_D | A22 | 50 | 0,28 | 114 | 100 | IM 2_DL | V10 | 30 | 0,35 | 95 |
| IM 2_D | A23 | 70 | 0,27 | 115 | 100 | | | | | |
| IM 2_D | A24 | 90 | 0,24 | 118 | 100 | | | | | |
| IM 3 | A25 | 30 | 0,51 | 90 | 0 | | | | | |
| IM 3 | A26 | 50 | 1,25 | 25 | 0 | | | | | |
| IM 3 | A27 | 70 | 3,08 | 0 | 20 | | | | | |
| IM 3 | A28 | 90 | 1,48 | 12 | 20 | | | | | |
| IM 3 | A29 | 30 | 0,82 | 60 | 0 | | | | | |
| IM 3 | A30 | 50 | 1,17 | 35 | 20 | | | | | |
| IM 3 | A31 | 70 | 1,59 | 5 | 20 | | | | | |
| IM 3 | A32 | 90 | 1,26 | 27 | 0 | | | | | |
| IM 3 | A33 | 30 | 0,88 | 59 | 0 | | | | | |

Tabelle 6: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 2, Quelle Körper P. [ANLAGE 05b]

In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die Untersuchungsergebnisse der Stufe 1 aufgeführt. Diese Messdaten sind zur Korrelation der in Stufe 2 gemessenen ESEM- Kontaktwinkel herangezogen worden. Es sind in Stufe 1 folgende Ergebnisse aufgeführt

- w-Wert [$\text{kg/m}^2\sqrt{t}$]
- Kontaktwinkel makroskopisch [$^\circ$]
- Injektionsmittelausbreitung [mm]

Im Ergebnis der makroskopischen Untersuchungen wurde die Korrelation zwischen den w-Werten und den makroskopisch gemessenem Kontaktwinkeln nachgewiesen. In den nachfolgend aufgeführten Tabellen Diagramm 4 bis Diagramm 7 sind die Relationen von makroskopisch ermittelten Kontaktwinkeln zu den gemessenen w-Werten, unterschieden nach den einzelnen Injektionsmitteln, aufgetragen. Um die Ergebnisse einordnen zu können ist jeweils der hydrophobe und der hydrophile Bereich dargestellt. Die Grenze für die Hydrophobie liegt analog Abbildung 35 bei einem w-Wert von $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{t}$ und bei einem Kontaktwinkel von 90° .

7.1.1 Auswertung der makroskopischen Messergebnisse

In Diagramm 1 und Diagramm 2 sind die einzelnen Ergebnisse für die w- Werte der 122 mit Injektionsmitteln behandelten Proben, aufsortiert auf die Probenarten und die verschiedenen Injektionsmittel, aufgeführt. Die Grenze zwischen Hydrophilie und Hydrophobie liegt nach Abbildung 35 bei $w=0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$.

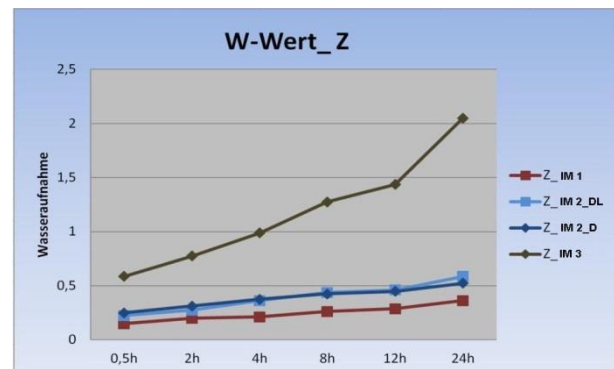
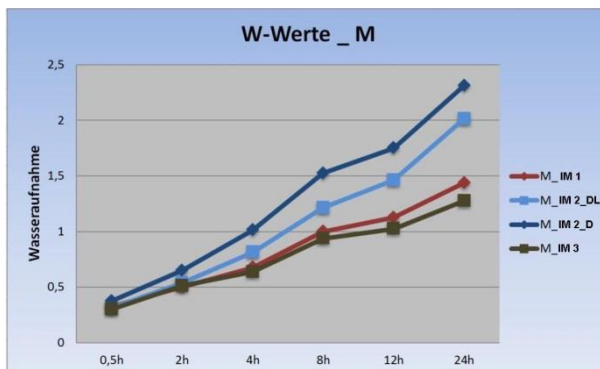


Diagramm 1: Ergebnisse w- Werte M / Z aufgegliedert auf die untersuchten Injektionsmittel, Quelle: Körber P. [ANLAGE 06a]

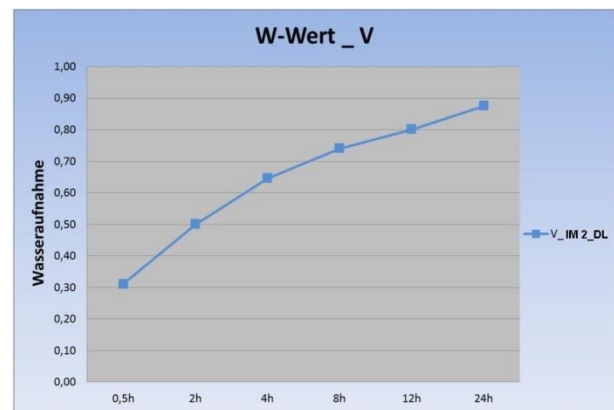
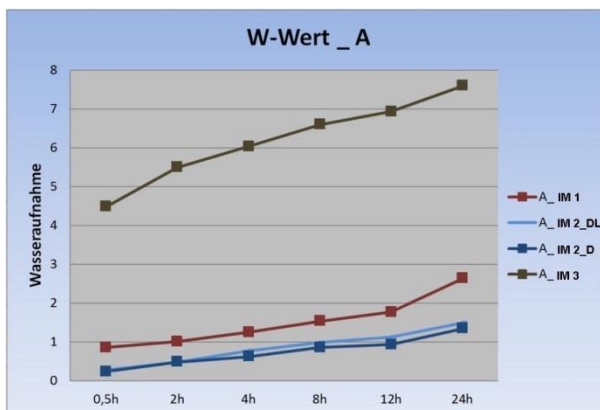


Diagramm 2: Ergebnisse w- Werte A/V aufgegliedert auf die untersuchten Injektionsmittel, Quelle: Körber P. [ANLAGE 06b]

Legende: M = Mörtel, Z = Ziegel neu 2,0, A = Ziegel Althaus, V = Verbund Althaus

In Diagramm 3 sind die w- Werte der 122 mit Injektionsmittel behandelten Proben koordiniert aufgeführt. Die Grenze zwischen Hydrophilie und Hydrophobie liegt auch hier bei $w=0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$.

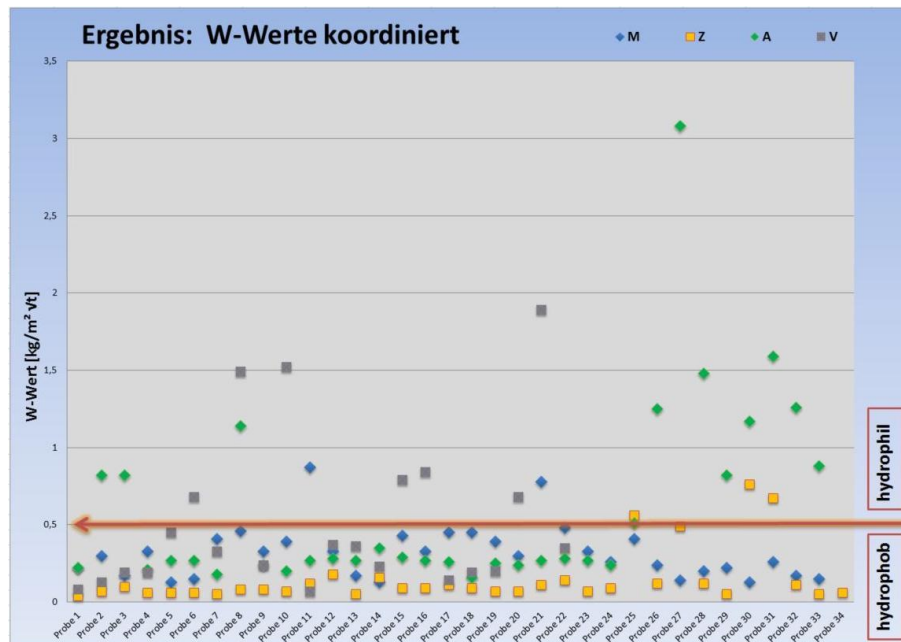


Diagramm 3: Ergebnisse aller 122 w- Werte für M, Z, A und V unterteilt in hydrophob und hydrophil, Quelle: Körber P. [ANLAGE 07]

Die Proben, deren gemessener w- Wert, sich unterhalb der eingetragenen Linie für $w=0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$ befindet, können gemäß Abbildung 35 als hydrophob bezeichnet werden. Diejenigen, deren gemessener w-Wert über dieser Linie liegt, werden als hydrophil bezeichnet. Im Ergebnis der w-Wert- Messungen wird unabhängig vom jeweiligen Injektionsmittel und unabhängig vom Durchfeuchtungsgrad festgestellt, dass sich die Ergebnisse der Proben M und Z sehr überwiegend im hydrophoben Bereich befinden. Wohingegen sich die w-Werte der Althaus-Proben A und V sehr stark nach oben in den hydrophilen Bereich aufgliedern. Die Althaus- Proben A und V zeichnen sich durch die bereits erfolgte Karbonatisierung und eine geringere Rohdichte aus. In Diagramm 5, Diagramm 6 und Diagramm 7 sind die Beziehungen zwischen den gemessenen makroskopischen Kontaktwinkeln und den gemessenen w-Werten, untergliedert nach den einzelnen Injektionsmitteln aufgeführt.

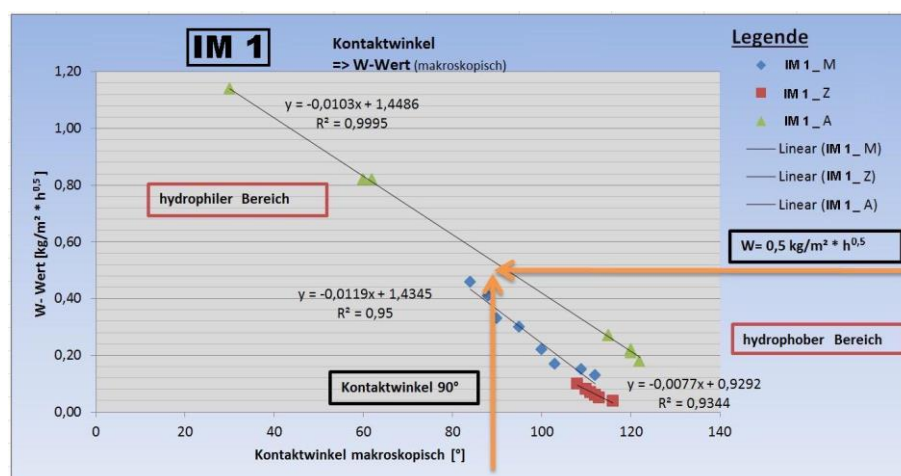


Diagramm 4: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 1 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert makroskopisch, aufsortiert auf die unterschiedlichen Probenarten: M, Z, A und V. Die Grenze der Hydrophobie ist bei $\theta=90^\circ$ und $w=0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$ definiert, Quelle: Körber P. [ANLAGE 08a]

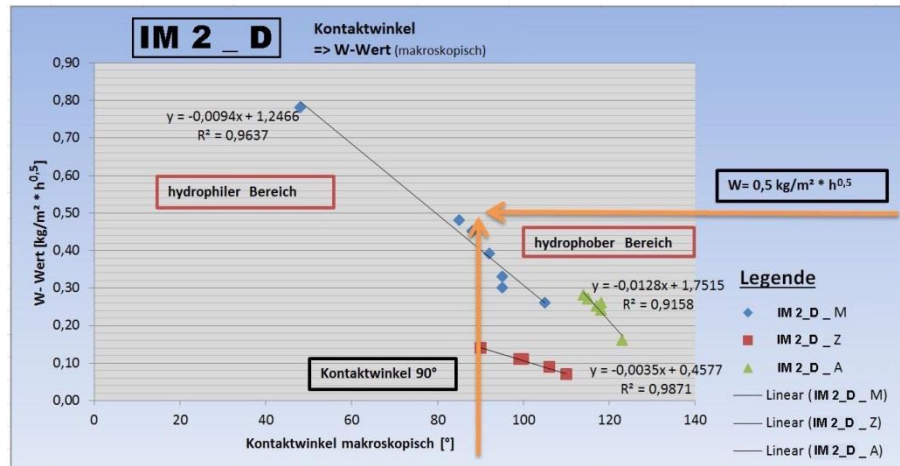


Diagramm 5: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 2_D (Druck) zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert makroskopisch, aufsortiert auf die unterschiedlichen Probenarten: M, Z, A und V. Die Grenze der Hydrophobie ist bei $\theta = 90^\circ$ und $w = 0,5 \text{ Kg}/\text{m}^2\sqrt{t}$ definiert, Quelle: Körber P. [ANLAGE 08b]

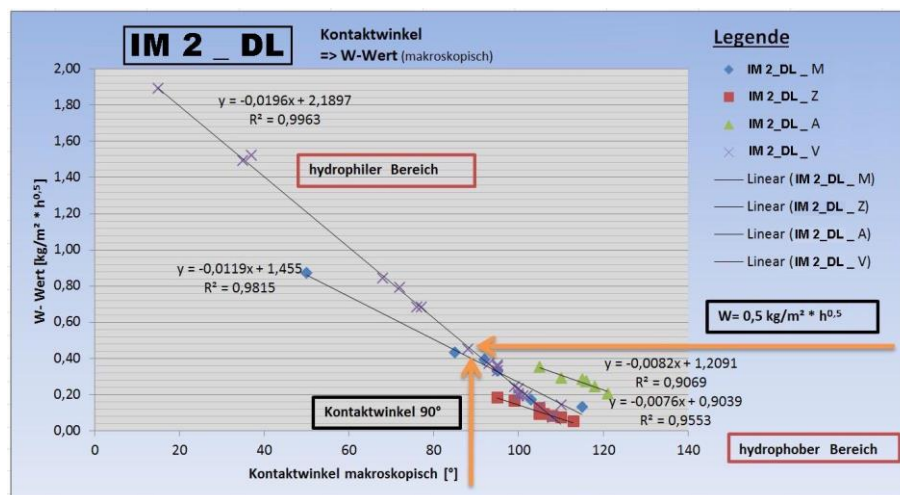


Diagramm 6: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 2_DL (drucklos) zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert makroskopisch, aufsortiert auf die unterschiedlichen Probenarten: M, Z, A und V. Die Grenze der Hydrophobie ist bei $\theta = 90^\circ$ und $w = 0,5 \text{ Kg}/\text{m}^2\sqrt{t}$ definiert, Quelle: Körber P. [ANLAGE 08c]

In der nachfolgend in Diagramm 8 aufgeführten Tafel ist für die Proben des Injektionsmittels IM 3 an neuen Ziegeln das Verhältnis von Kontaktwinkel (makroskopisch) und dem Injektionsmittel- Ausbreitungsmaß beispielhaft dargestellt worden. Es wird hierbei eine Auswahl von Proben: Z25 bis Z32, betrachtet. In Bezug auf die Vorgaben für Bohrlochabstände bei Injektionsmittelanwendungen werden die Aussagen des WTA Merkblattes 4-10-2015 [66] herangezogen. Diese Bohrlochabstände werden auch in vielfältiger Form in Veröffentlichungen und in der Fachliteratur als zutreffend zitiert. Im WTA Merkblatt 4-10-2015 heißt es, dass die Bohrlöcher für zertifizierte Injektionsmittel in der Anwendung im Bohrlochverfahren folgende horizontale Abstände besitzen sollen:

- 10 – 12,5 cm [66]

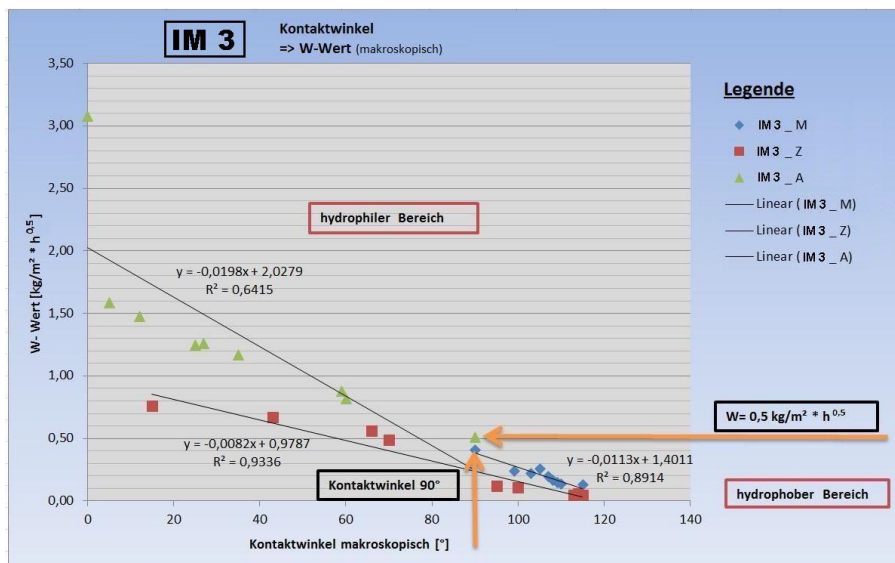


Diagramm 7: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 3 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert makroskopisch, aufsortiert auf die unterschiedlichen Probenarten: M, Z, A und V. Die Grenze der Hydrophobie ist bei $\theta = 90^\circ$ und $w = 0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$ definiert, Quelle: Körber P. [ANLAGE 08d]

Im Ergebnis der hiesigen Untersuchung ist in Diagramm 8 erkennbar, dass die Ausbreitung des Injektionsmittels IM 3 in den Ziegeln, mit der numerischen Zunahme des makroskopischen Kontaktwinkels, größer wird. Dennoch erreicht die Ausbreitung in diesem untersuchten Fall nicht die Vorgaben der WTA (10 – 12,5 cm) [66]. Die Ausbreitung eines Injektionsmittels im Baustoff steht in direktem Zusammenhang mit der Wirksamkeit des Injektionsmittels und ist daher ein Indikator für die Wirksamkeit. An der Mehrheit der hier untersuchten Proben ist die Ausbreitung des Injektionsmittels im Blick auf die Forderungen der WTA [66] deutlich zu gering bemessen. Insofern müsste in diesem Fall der Bohrlochabstand geringer gewählt werden, um eine gleichbleibende Wirksamkeit sicherstellen zu können. Diese Messergebnisse verdeutlichen den Bedarf, ein Nachweisverfahren zu etablieren, das die Wirksamkeit des Injektionsmittels an Proben, die aus dem mit Injektionsmitteln behandelten Mauerwerk stammen, belegen kann. Geschieht dieser Nachweis frühzeitig im Injektionsprozess, kann beispielsweise dahingehend darauf reagiert werden, dass die Bohrlochabstände enger gewählt werden.

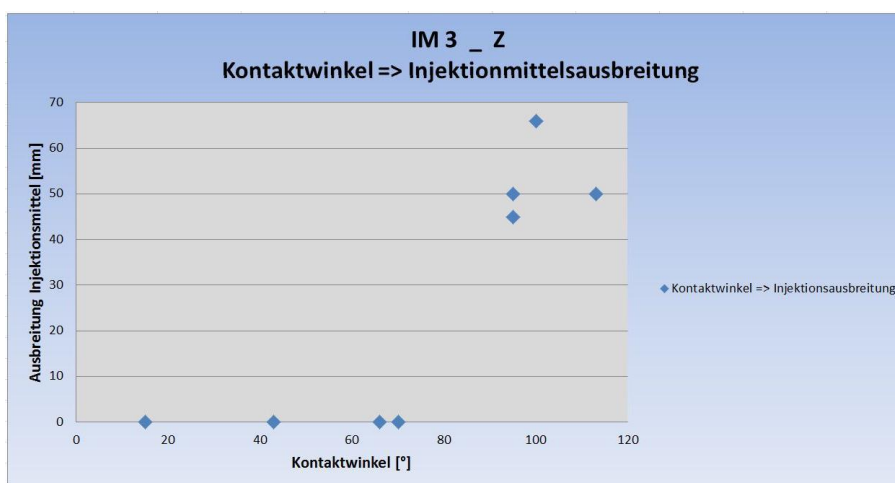


Diagramm 8: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 3 zwischen Kontaktwinkeln makroskopisch und der Injektionsmittelausbreitung, Probenart: Z, Quelle: Körber P. [ANLAGE 09]

8. VERSUCHE DER STUFEN 1a UND 2

8.1 Ergebnisse der ESEM- Untersuchung, Stufe 2

| Injektionsmittel | Probe | Mess- Sonde | Datenlogger- Messung | REM im ESEM- Mode |
|------------------|-------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| | | | RH [%] | ESEM Messwert [°] |
| IM 2_DL | V5 | M02 A1 | 44% | 95,50 |
| IM 2_DL | V5 | M04 A2 | 36% | 110,00 |
| IM 2_DL | V5 | M06 B1 | 62% | 64,00 |
| IM 2_DL | V5 | M08 B2 | 60% | 68,00 |
| IM 2_DL | V1 | M02 A1 | 100% | 0,00 |
| IM 2_DL | V1 | M04 A2 | 100% | 0,00 |
| IM 2_DL | V1 | M06 B1 | 65% | 60,00 |
| IM 2_DL | V1 | M08 B2 | 74% | 56,20 |
| IM 2_DL | V1 | M08 D1 | 100% | 0,00 |
| IM 3 | Z29 | M02 A1 | 80% | 34,00 |
| IM 3 | Z29 | M04 A2 | 48% | 88,50 |
| IM 3 | Z29 | M06 B1 | 96% | 0,00 |
| IM 3 | Z29 | M08 B2 | 100% | 0,00 |
| IM 3 | A27 | M02 A1 | 100% | 0,00 |
| IM 3 | A27 | M04 A2 | 100% | 0,00 |
| IM 3 | A27 | M06 B1 | 100% | 0,00 |
| IM 3 | A27 | M08 B2 | 100% | 0,00 |
| IM 2_DL | A12 | M02 A1 | 62% | 64,00 |
| IM 2_DL | A12 | M04 A2 | 72% | 59,00 |
| IM 2_DL | A12 | M06 B1 | 63% | 63,00 |
| IM 2_DL | A12 | M08 B2 | 71% | 71,00 |

An den Proben V5, V1, Z29, A27 und A12 wurden mindestens je 4 Sensoren, zur Ermittlung der Relativen Feuchte in den Messkammern im Probeninneren, befestigt. Die Sensoren wurden in Bohrschäfte eingebracht und luftdicht verschlossen. Die Messkammern besaßen eine Größe von ca. 8 * 10 mm. Die Proben wurden nach der Trocknung analog der w-Wert Bestimmung in ein Wasserbad mit konstantem Wasserpegel eingestellt, sodass die Wasseraufnahme der Proben über kapillares Saugen erfolgt ist. Die Messungen wurden mittels Datenlogger-Aufzeichnungen bis zur Messwertkonstanz geschrieben. Die auf diese Weise ermittelten Werte für die Relative Feuchte beschreiben das Mikroklima in der jeweiligen Messkammer. Die Messsonden wurden bewusst sowohl in der jeweiligen Injektionsebene als auch in nichthydrophobierten Bereichen platziert. Im Nachgang wurden neue Materialproben aus der direkten Umgebung der Messkammern entnommen. An diesen Proben wurde in Stufe 2 im ESEM der mikroskopische Kontaktwinkel bestimmt. Neben den makroskopischen w-Werten und den makroskopischen Kontaktwinkeln dienen die gemessenen Relativen Feuchten der Einordnung der im ESEM gemessenen mikroskopischen Kontaktwinkel. In einem Rechenmodell wurden den im ESEM gemessenen Kontaktwinkeln zum einen w-Werte und zum anderen fiktive Feuchtegehalte zugeordnet. Die Wassergehalte sind bei der Zuordnung der Messwerte lediglich eine fiktive Größe, die von dem Wasserangebot vor Ort abhängt und in einer Simulation verarbeitet werden.

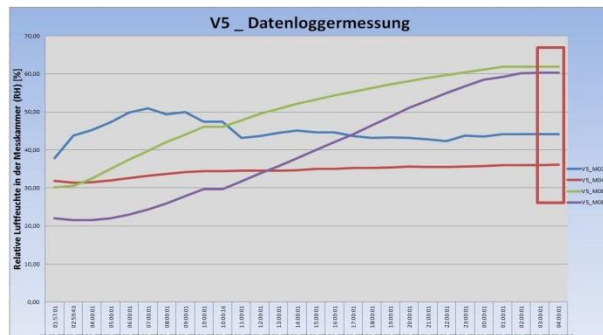
Tabelle 7: Messergebnisse Datenloggermessungen und ESEM- Kontaktwinkel an 5 Proben: V5, V1, Z29, A27 und A12 mit je 4 – 5 Messsonden, Quelle: Körber P. [ANLAGE 10]

Mit diesen fiktiven Wassergehalten und den RH- Werten kann eine fiktive Befeuchtung in einer rechnergestützten Feuchtesimulation simuliert werden. Die Ergebnisse der ESEM- Kontaktwinkel und RH- Messungen sind in Tabelle 7 aufgeführt.

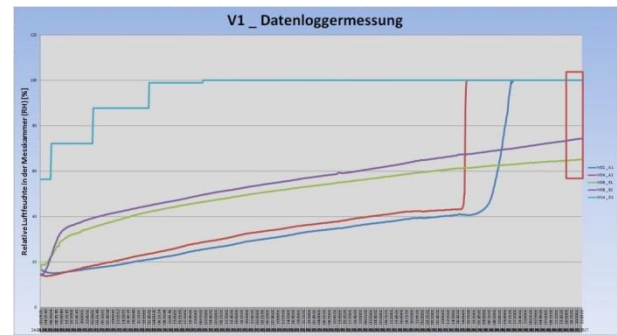
8.1.1 Prüfergebnisse des Datenlogger- Messverfahrens, Stufe 1a

Aus den in Stufe 1 untersuchten 122 Proben wurden 5 Stück für die Untersuchung in Stufe 1a ausgewählt. An diese Proben, die je mit 4 oder 5 versiegelten Messsonden, analog Abbildung 50 versehen

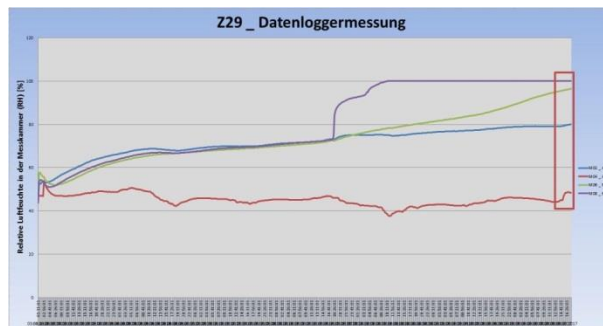
worden sind, wurden die Relativen Luftfeuchten in den abgeschlossenen Messkammern inmitten des Probenmaterials an hydrophobierten und nicht hydrophobierten Bereichen gemessen. Die Messdaten wurden fortlaufend über Zeiträume zwischen 26 und 189 Stunden bis zur Messkonstanz geschrieben. Zur Vorbereitung des Versuchs wurden die Proben im Darrofen getrocknet. Unter dem Versuch wurde der Wasserstand im Wasserbad gleichbleibend hoch gehalten. Im Diagramm 9 sind die Messwerte der Datenloggermessungen bis zur Messkonstanz aufgeführt.



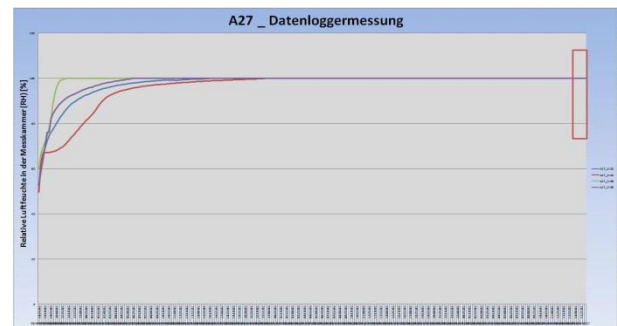
a)



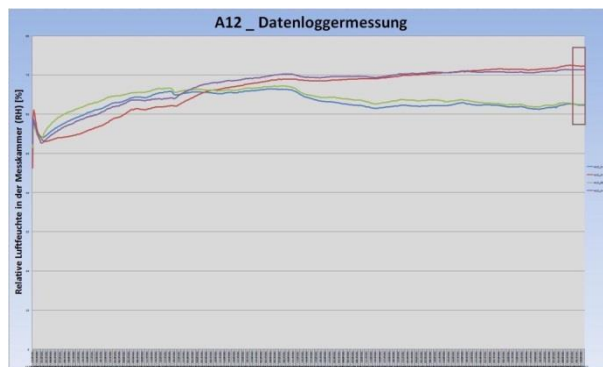
b)



c)



d)



e)

Diagramm 9:

Ergebnisse der Datenloggermessungen an den Proben:

- a) V5: RH-Werte für 4 Messsonden, Zeitraum 26 Stunden
- b) V1: RH-Werte für 5 Messsonden, Zeitraum 189 Stunden
- c) Z29: RH-Werte für 4 Messsonden, Zeitraum 148 Stunden
- d) A27: RH-Werte für 4 Messsonden, Zeitraum 69 Stunden
- e) A12: RH-Werte für 4 Messsonden, Zeitraum 181 Stunden

Die roten Felder markieren das Erreichen der Messkonstanz,

Quelle: Körber P. [ANLAGE 11 a – e]

Das Verfahren dieses Versuchs basiert auf dem kapillaren Saugen, analog zum w-Wert Verfahren, siehe 4.2. Beim Erreichen der Messkonstanz ist die kapillare Sättigung erreicht. Die im Nachgang zu den Datenloggermessungen aus den anliegenden Bereichen um die Messkammern zur Untersuchung im ESEM entnommen Proben zeigen auf Grund der Probenauswahl sehr unterschiedliche Messwerte, da sie gezielt sowohl auf der Injektionsebene als auch auf nicht hydrophobierten Bereichen stammen. Dieses Verfahren ermöglicht es, die im Anwendungsfall im Prüfverfahren anzutreffenden Gegebenheiten zu emulieren. Die Messstellen der Probenentnahme für die ESEM- Messungen können im Anwendungsfall im Mauerwerk eingemessen und in ihrer Tiefe gestaffelt angeordnet werden. In der Auswertung entsteht ein räumliches Bild von der veränderten Kapillarität des Mauerwerks. Die gemessenen RH- Werte werden im Folgenden mit den ESEM- Kontakt- Winkeln und den makroskopischen Messdaten aus Stufe 1 korreliert.

8.1.2 Stufe 2: ESEM- Kontaktwinkel, korrelierte w-Werte, RH- Werte

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Datenloggermessungen in Beziehung zu den gemessenen ESEM-Kontaktwinkeln und den aus der rechnerischen Modellierung ermittelten w-Werten in Diagramm 10 aufgetragen. Die Grenze der Hydrophobie ist mit $W = 0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{t}$ und einem Kontaktwinkel von 90° aufgetragen. Im Ergebnis wird festgestellt, dass der RH- Wert und die ESEM- Kontaktwinkel, als lineare Funktionen ausgedrückt, exakt retrograd verlaufen. Die makroskopisch ermittelt und rechnerisch modellierten zugehörigen w-Werte laufen, als lineare Funktion ausgedrückt, parallelverschoben zu den RH-Werten. Diese Auswertung belegt die Evidenz des hier beschriebenen Nachweisverfahrens.

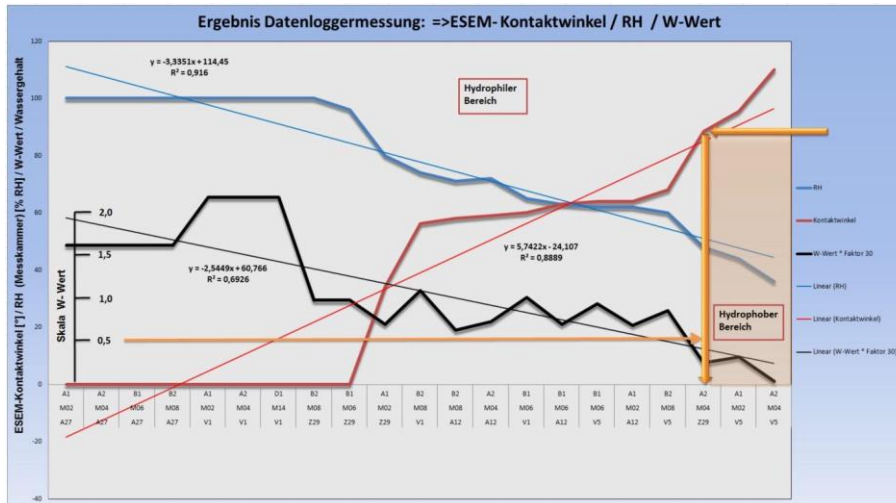


Diagramm 10:

Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den Datenloggermessungen und den makroskopischen w-Werten.

Die Grenze der Hydrophobie ist mit bei $\theta = 90^\circ$ und $w = 0,5 \text{ Kg/m}^2\sqrt{t}$ definiert,

Quelle: Körber P.
[ANLAGE 12]

8.1.3 Beziehung ESEM- Kontaktwinkel: RH / W-Wert / Wassergehalt

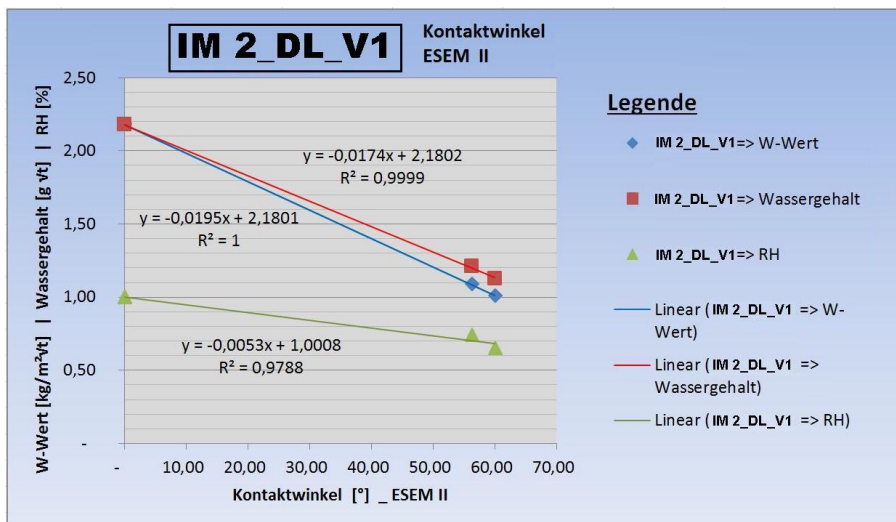


Diagramm 11:

Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe V1: Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den makroskopischen w-Werten, den Wassergehalten und den RH-Werten,

Quelle: Körber P.

[ANLAGE 13 a]

In Diagramm 11 bis Diagramm 15 sind die Auswertungen der Kontaktwinkelmessungen im ESEM in Beziehung zu den in der Modellierung errechneten w-Werten und Wassergehalten, sowie zu den RH-Werten, gegliedert nach den einzelnen Injektionsmitteln/Proben, als lineare Funktionen aufgetragen. Im Ergebnis dieser Betrachtung ist bei den Steigungen der Funktionen (hier negativ) zu beurteilen, inwieweit Kongruenzen vorliegen. Erkennbar ist zudem, dass die w-Werte, die unterhalb der Marke $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{t}$ liegen einen Kontaktwinkel jenseits von 90° besitzen. Insofern sind die hier verwendeten Grenzen der Hydrophobie/Hydrophilie stimmig. An den Proben IM3_A27 wurden im ESEM keine Tropfenbildung festgestellt, es hat eine sofortige Wasserfilmbildung eingesetzt, siehe dazu 9.3.1.

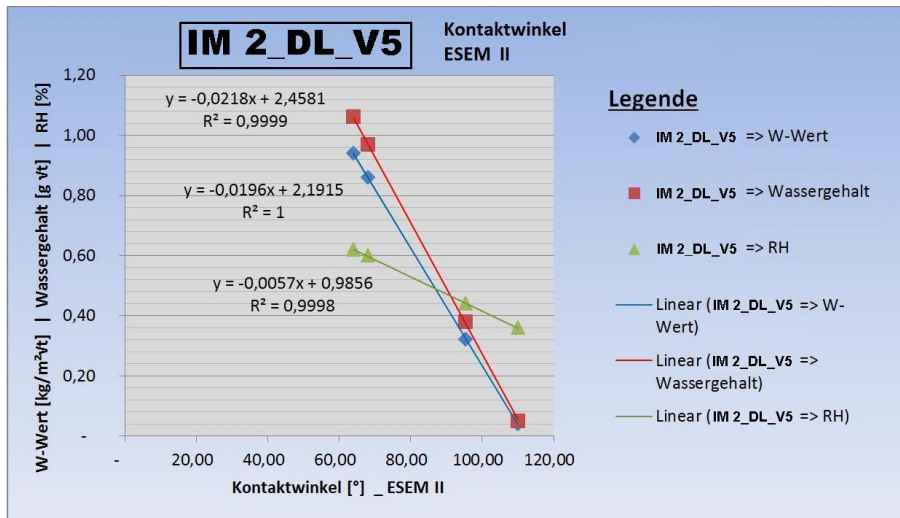


Diagramm 12:

Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe V5: Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den makroskopischen w-Werten, den Wassergehalten und den RH-Werten,

Quelle: Körber P.

[ANLAGE 13 b]

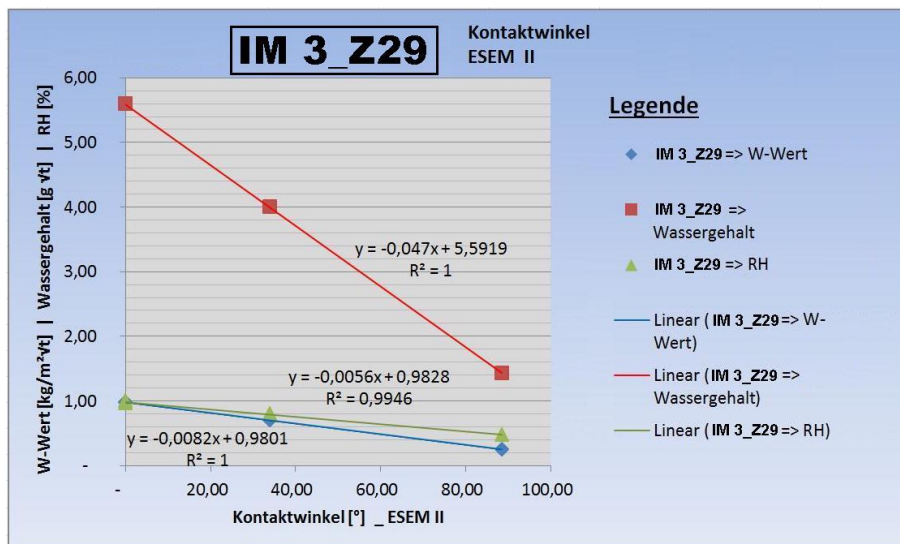


Diagramm 13:

Injektionsmittel IM 3 an der Probe Z29: Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den makroskopischen w-Werten, den Wassergehalten und den RH-Werten,

Quelle: Körber P.

[ANLAGE 13 c]

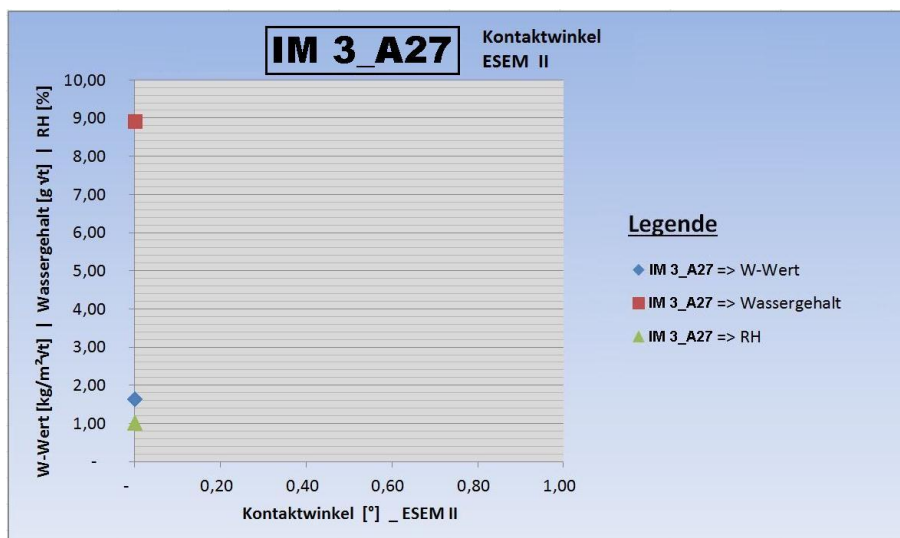


Diagramm 14:

Injektionsmittel IM 3 an der Probe A27: Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den makroskopischen w-Werten, den Wassergehalten und den RH-Werten,

Quelle: Körber P.

[ANLAGE 13 d]

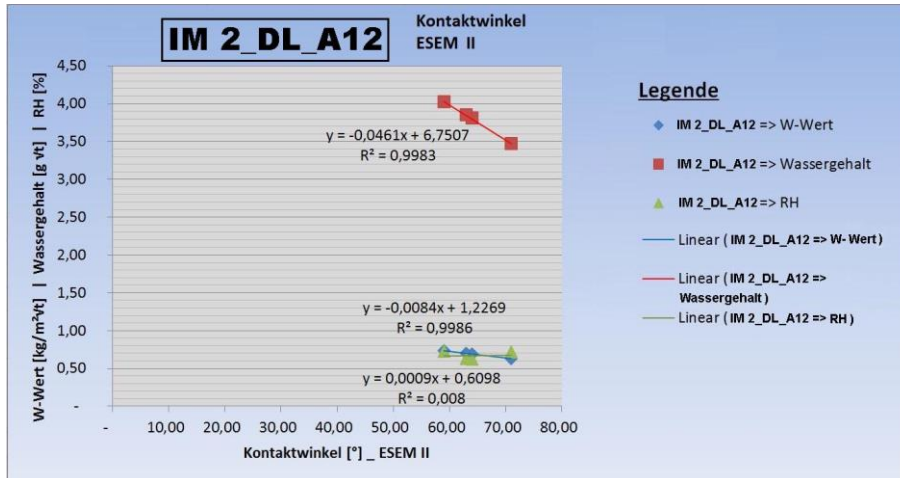


Diagramm 15:

Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe A12: Ergebnis der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel in Beziehung zu den makroskopischen w-Werten, den Wassergehalten und den RH-Werten,

Quelle: Körber P.

[ANLAGE 13 e]

9. ERGEBNISSE DER REM / ESEM UNTERSUCHUNGEN, STUFE 2

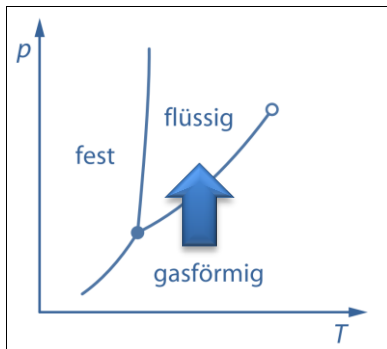
9.1 Das Rasterelektronen Mikroskop im ESEM- Mode

Das Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) ist eine spezielle Variante des Rasterelektronenmikroskops (REM englisch: SEM) [140], [141], [142]. Der wesentliche Unterschied zu einem konventionellen Rasterelektronenmikroskop (REM) liegt in dem geringeren Vakuum in der Kammer. Für den Betrieb des ESEM wird zudem ein spezieller Detektor eingebaut. Auf Grund des geringeren Vakuums (Low vac mode) kann der Kammer im ESEM- Mode ein Medium zugeführt werden. In den hiesigen Versuchen ist das zugeführte Medium Wasser / Wasserdampf. Der Gasdruck in der Kammer des ESEM beträgt üblicher Weise 130 bis 1300 Pascal. In gleicher Weise, wie bei der Nutzung des REM, wird die Probe im ESEM von einem fokussierten Elektronenstrahl abgerastert. Das dabei durch eine Wechselwirkung mit der Probe entstehende Signal wird vom Detektor aufgenommen und zur Bilderzeugung verwendet. Das ESEM nutzt die Entstehung von niederenergetischen Sekundärelektronen (0 bis 50 eV), die von der Probenoberfläche als langsame Elektronen emittiert werden. Zur Signalverstärkung nutzt das ESEM das Gas in der Probenkammer, welches durch Ionisierung eine Verstärkungskaskade erzeugt. Durch dieses System werden auch Aufladungen der Proben neutralisiert. Der wichtigste Unterschied des ESEM zum Betrieb im Hochvakuum (=REM) ist, dass im niedrigem Vakuum das Wasser aus der Probe nicht 'ausgetrieben' wird und somit gerade Betauungsvorgänge (Tropfenbildung) sichtbar gemacht werden können. Zu diesem Zweck ist der Detektor des ESEM weder licht- noch temperaturempfindlich. Um die Wasserbenetzungs- und Trocknungsprozesse im ESEM sichtbar machen zu können, werden die druck- und temperaturabhängigen unterschiedlichen Aggregatzustände des Mediums, hier Wasser, genutzt. Zu diesem Zweck wird in der Kammer ein Kühltisch angeordnet, der an einen Umlaufkühler angeschlossen ist. Die Probe wird auf diesem Kühltisch mit Kohlenstoff oder Leitsilber verklebt, um eine optimale Temperaturleitfähigkeit zu gewährleisten. Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit wurden die Temperaturverhältnisse des Kühltisches fest eingestellt, während der Kammerdruck geändert wurde. Auf diese Weise wird ein Wechsel des Aggregatzustands des in der Kammer befindlichen Mediums provoziert (von gasförmig nach flüssig). Wird an der Probe der Taupunkt erreicht, kondensiert das Wasser an der Probenoberfläche aus. Dieser Vorgang wird mithilfe von Bildern festgehalten. Im ESEM kann der entstehende Kontaktwinkel eines Tropfens in situ mit dem Kontaktwinkel- Messverfahren gemessen werden. Es können Fortschritt-, Rückzugs- oder statische Kontaktwinkel an reifen Tropfen gemessen werden.

Soll ein Trocknungsprozess gezeigt werden, kann das entstandene Tauwasser durch Absenken des Kammerdrucks verdampft werden und die Trocknung wird sichtbar gemacht. Grundsätzlich ist das ESEM sehr gut geeignet dynamische Betauungen in situ zu zeigen.

[143], [144], [145], [146], [147], [148]

9.1.1 Phasendiagramm von Wasser in Bezug auf Temperatur / Druck



In Abbildung 51 sind die Grenzkurven der 3 Phasen gasförmig (Wasserdampf), flüssig (Wasser) und fest (Wasser-Eis) dargestellt [149]. Die 3 Phasenbereiche treffen sich im Tripelpunkt. In diesem Punkt sind die 3 Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht. Im Rahmen der Untersuchungen im ESEM wird die Abhängigkeit des Aggregatzustands der Phasen von einerseits der Temperatur und andererseits dem Druck, genutzt. Zunächst wird ein vergleichsweise niedriger Druck (im vorliegenden Fall 600 Pa) in der Kammer des ESEM angelegt, während das Medium in der Kammer gasförmig (vorliegend Wasserdampf mit 100% Relativer Feuchte) ist.

Abbildung 51: Phasendiagramm, Quelle: Harten U., Physik für Ingenieure, 2017 [150]

Der Kühltisch, auf dem die Probe thermisch leitend befestigt ist, wird konstant bei einer niedrigen Temperatur (vorliegend 2°C) gehalten. Zur Auslösung des Btauungsvorgangs wird nun der Druck in der Kammer schrittweise erhöht, bis die Phasengrenze überschritten ist und es zum Ausfall von Tauwasser kommt. [151],

9.1.2 Funktionsweise des ESEM in Schaubildern

In Abbildung 52, Abbildung 53 und Abbildung 54 ist in die Funktionsweise des ESEM erläutert:

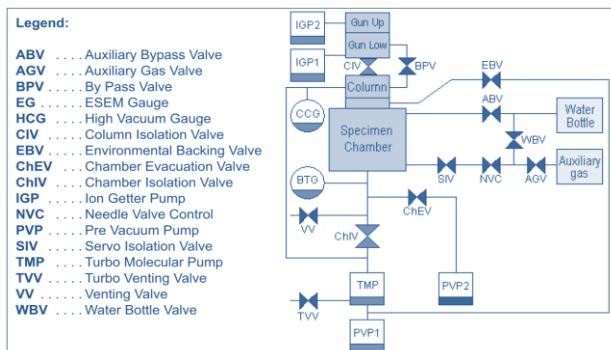


Abbildung 52:

Schaubild: Funktionsgruppen ESEM, Quelle: FEI [152], [153]

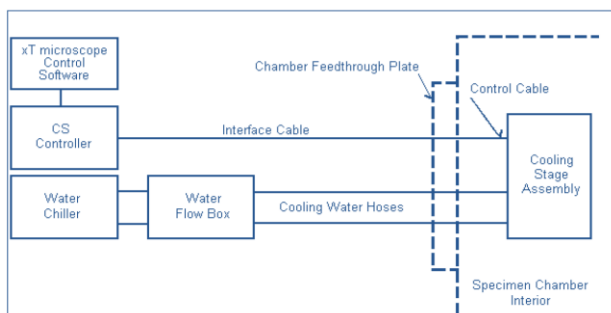


Abbildung 53:

Schaubild: Funktion Kühltisch ESEM, Quelle FEI [152], [153]

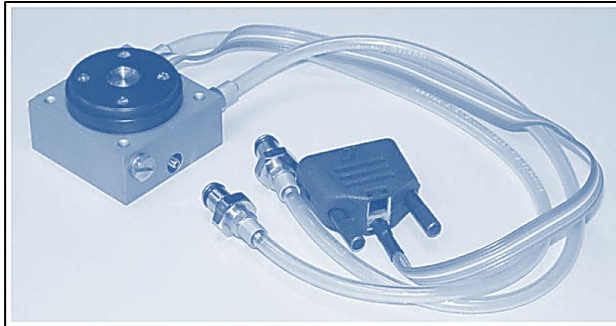


Abbildung 54:

Schaubild: Kühltisch ESEM, Quelle FEI [152], [153]

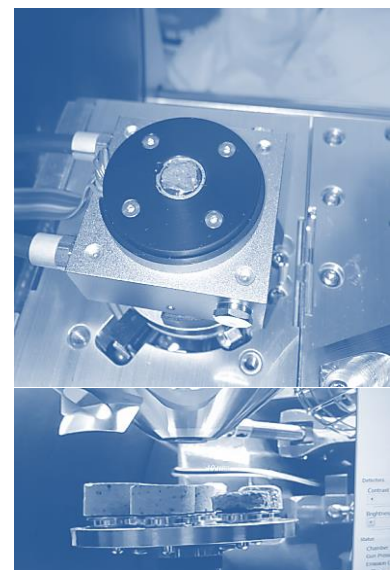
9.1.3 Stufe 2: Der ESEM- Mode des REM



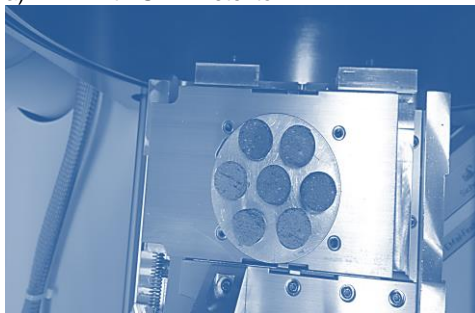
a) REM mit ESEM Detektor



b) REM: Kammer, Probenstisch



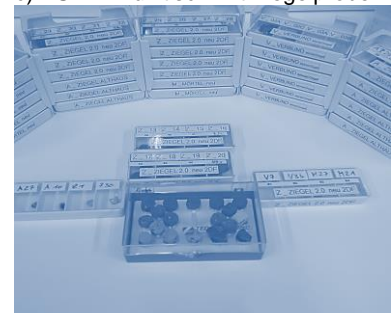
c) ESEM: Kühltisch mit Ziegelprobe



d) REM; Probenstisch



e) ESEM: Medienzuführung

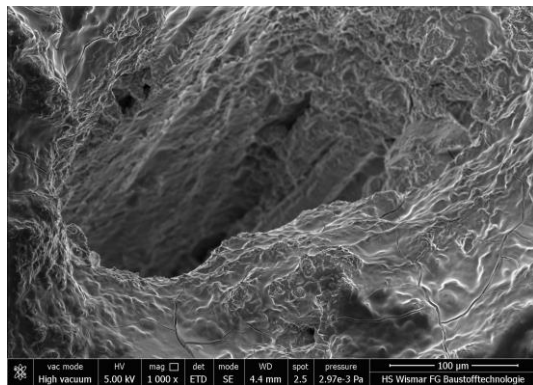


f) Verwendete Proben

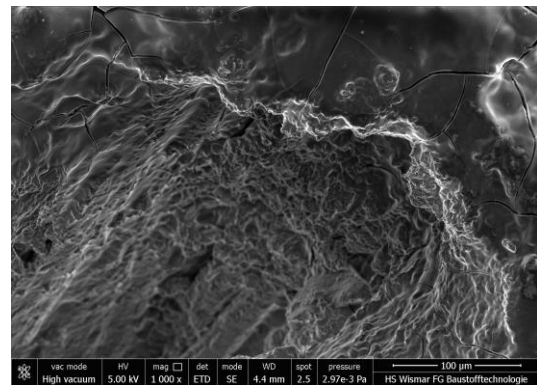
Abbildung 55: Verwendetes ESEM Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design, Faculty of engineering, Stufe 2, Quelle: Körber P. [ANLAGE 14]

9.2 REM: Untersuchung des Hydrophobierungs- Films

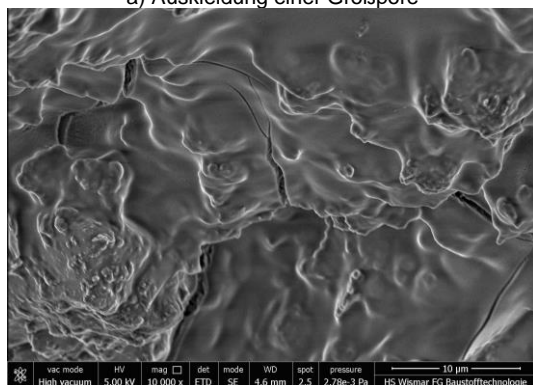
Nachfolgend sind die hiesigen Untersuchungen des Hydrophobierungsfilms im REM an Ziegel- Proben beispielhaft aufgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung kann exemplarisch die Verteilung / Ausbreitung / Bedeckung des Probenmaterials mit der filmbildenden Hydrophobierung gezeigt werden. Die Filmdicke kann gemessen werden.



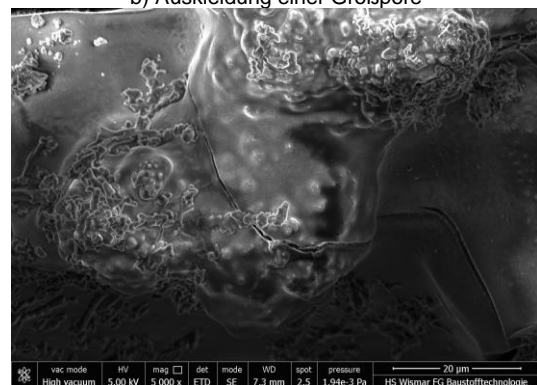
a) Auskleidung einer Großpore



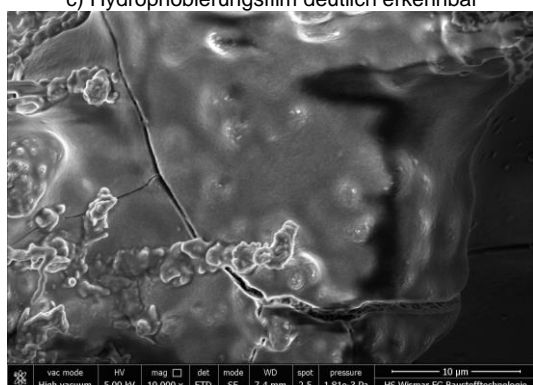
b) Auskleidung einer Großpore



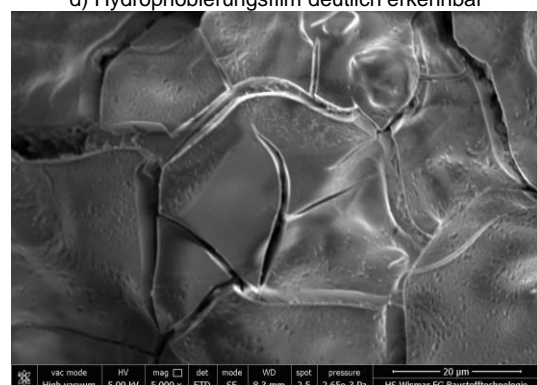
c) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



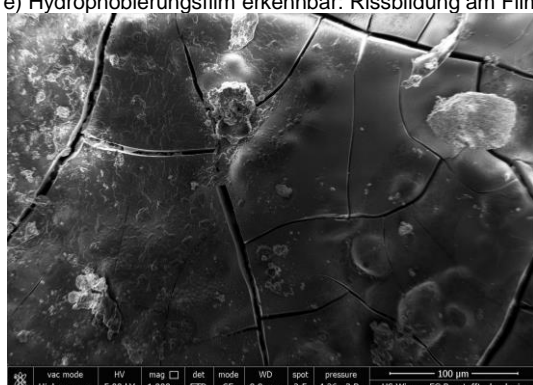
d) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



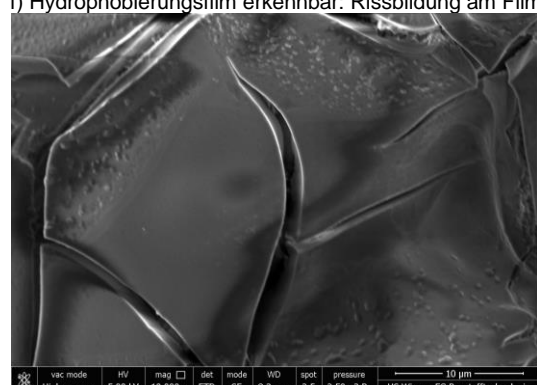
e) Hydrophobierungsfilm erkennbar: Rissbildung am Film



f) Hydrophobierungsfilm erkennbar: Rissbildung am Film



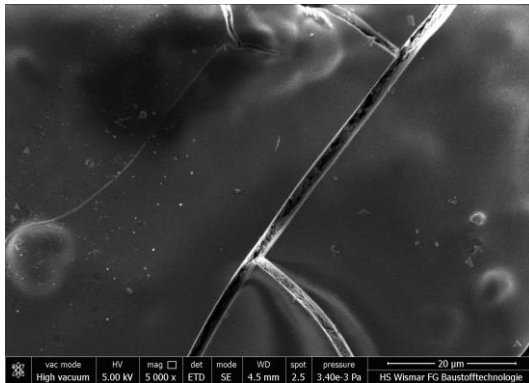
g) Hydrophobierungsfilm erkennbar: Rissbildung am Film



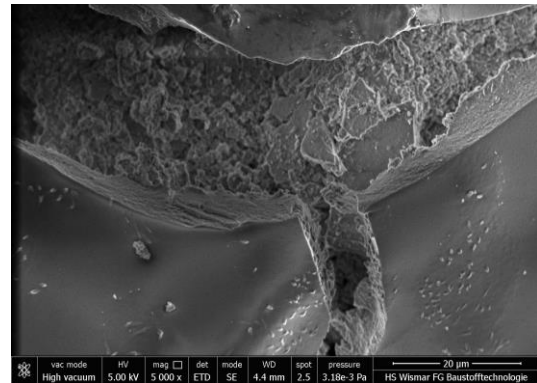
h) Hydrophobierungsfilm erkennbar: Rissbildung am Film

Abbildung 56: a) bis h) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilms im REM, beispielhaft:

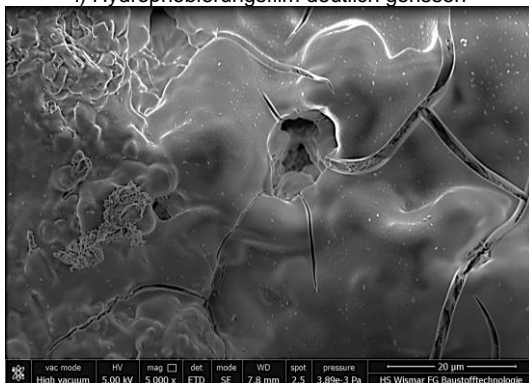
Material =>ZIEGEL, Quelle: Körber P.



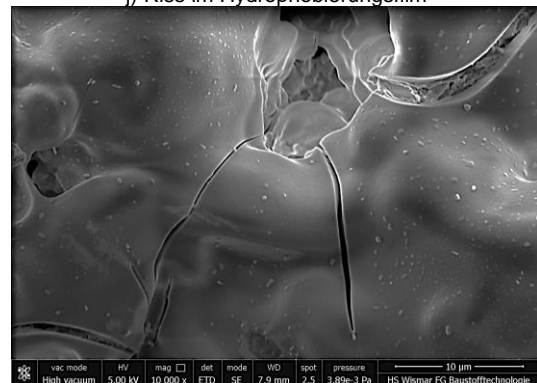
i) Hydrophobierungsfilm deutlich gerissen



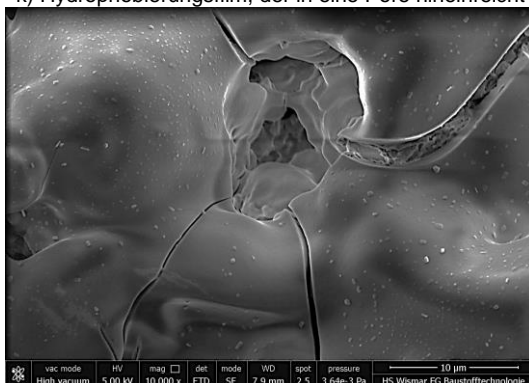
j) Riss im Hydrophobierungsfilm



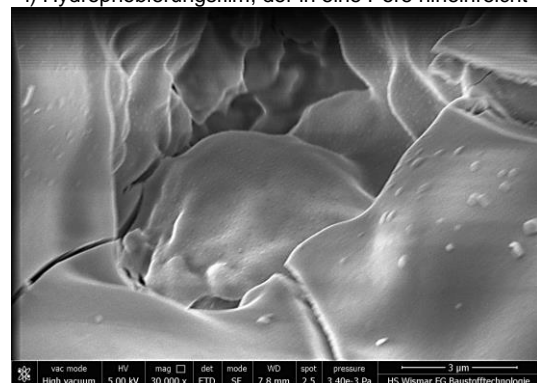
k) Hydrophobierungsfilm, der in eine Pore hineinreicht



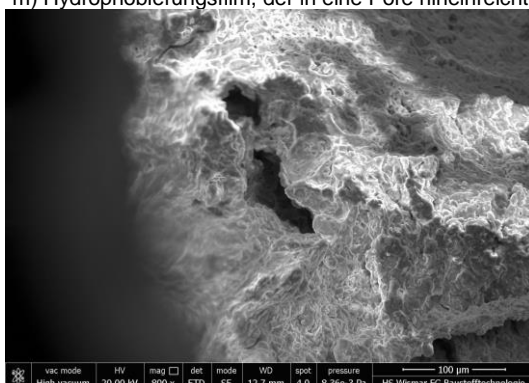
l) Hydrophobierungsfilm, der in eine Pore hineinreicht



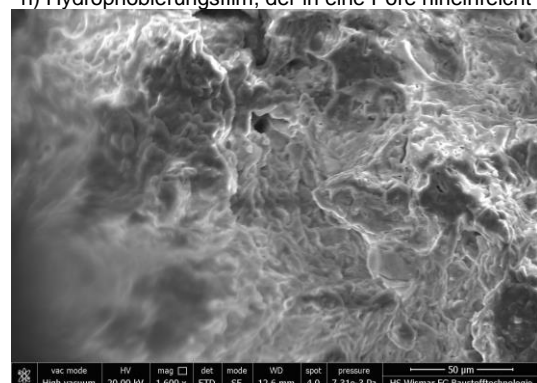
m) Hydrophobierungsfilm, der in eine Pore hineinreicht



n) Hydrophobierungsfilm, der in eine Pore hineinreicht



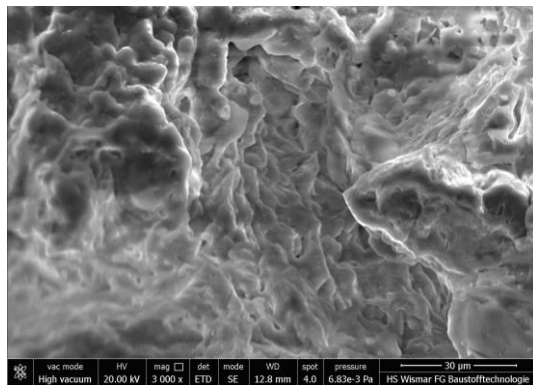
o) Probe ist mit Hydrophobierungsfilm ausgekleidet



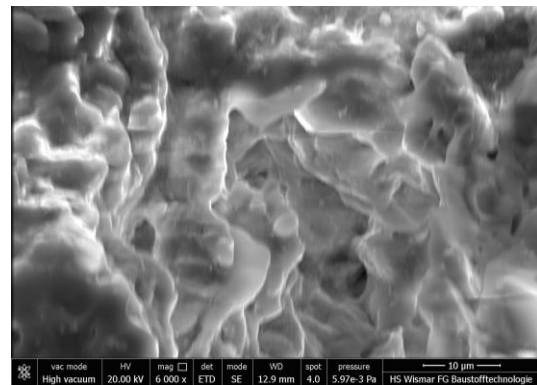
p) Probe ist mit Hydrophobierungsfilm ausgekleidet

Abbildung 57: i) bis p) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM, beispielhaft:

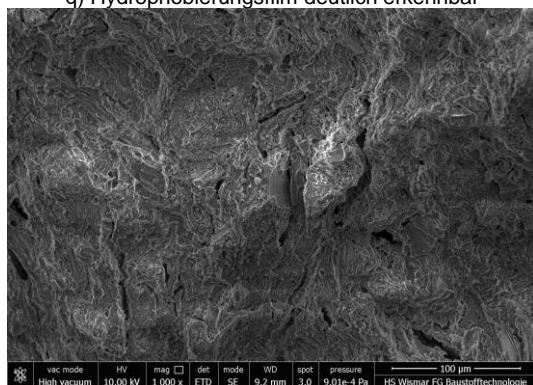
Material =>ZIEGEL, Quelle: Körber P.



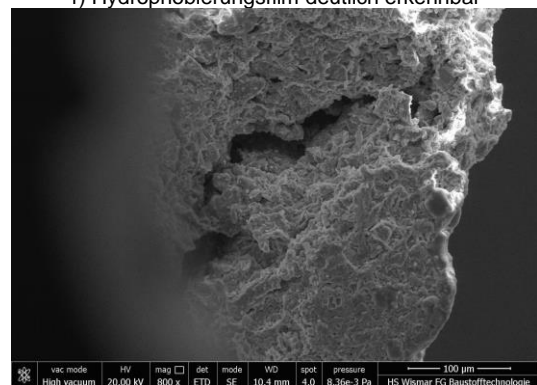
q) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



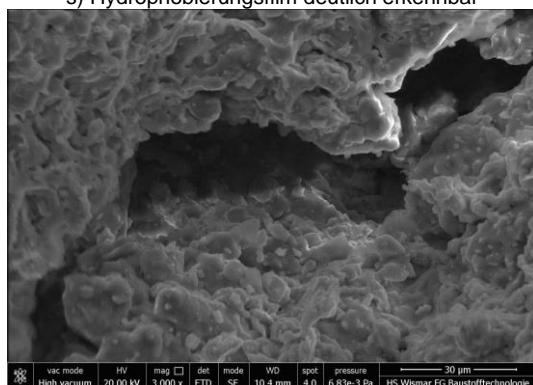
r) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



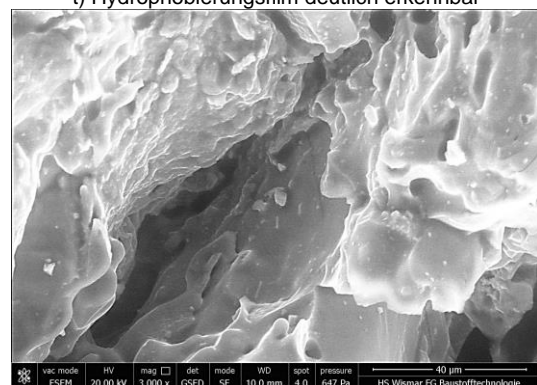
s) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



t) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



u) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar

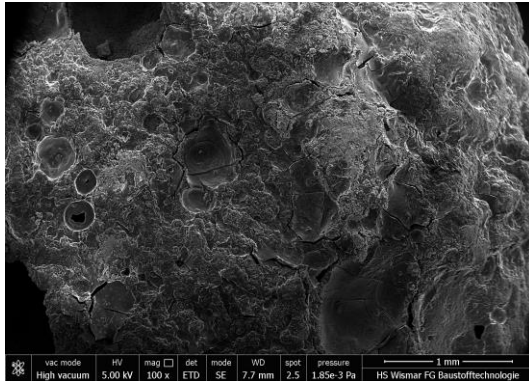


v) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar

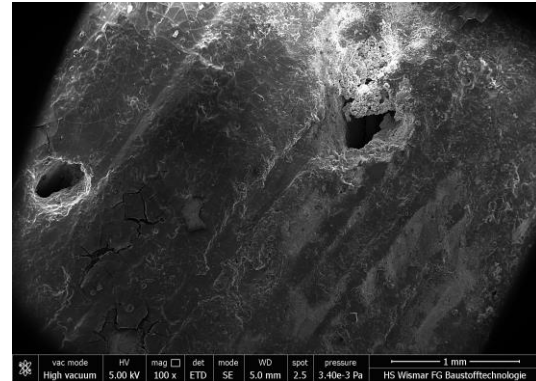
Abbildung 58: q) bis v) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM, beispielhaft:

Material =>ZIEGEL, Quelle: Körber P.

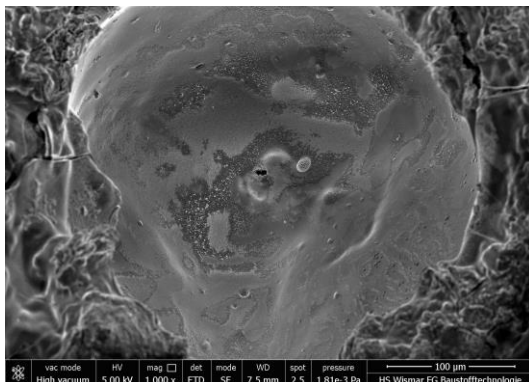
Die Ergebnisse der REM- Untersuchungen des Hydrophobierungsfilms sollen im Rahmen des Nachweisverfahrens die Datenbasis verbreitern. Es müssen Korrelationen mit den Ergebnissen der Kontaktwinkelmessungen vorliegen. Das Verfahren kann bei filmbildenden Injektionsmitteln eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird belegt, dass der Hydrophobierungsfilm in Zusammenhang mit den Ergebnissen aus den übrigen Versuchen steht. In Abbildung 56, Abbildung 57 und Abbildung 58 werden REM- Untersuchungen an Ziegelproben exemplarisch gezeigt. Anhand dieser Untersuchungen kann stichprobenartig nachgewiesen werden, inwieweit Poren mit dem (hier filmbildenden) Hydrophobierungsmittel ausgekleidet sind. Des Weiteren kann der Unterschied zwischen Druckinjektion und druckloser Injektion sichtbar und nachprüfbar gemacht werden. In Abbildung 59 sind die hiesigen Untersuchungen des Hydrophobierungsfilms im REM an Mörtel- Proben beispielhaft aufgeführt. Die filmbildende Hydrophobierung kann auch hier gezeigt werden. Es ist deutlich nachvollziehbar, inwieweit Poren der Proben mit dem Hydrophobierungsfilm ausgekleidet sind. Die Untersuchungen des Hydrophobierungsfilms sollen der Flankierung und Stützung der Ergebnisse der ESEM- Untersuchungen dienen.



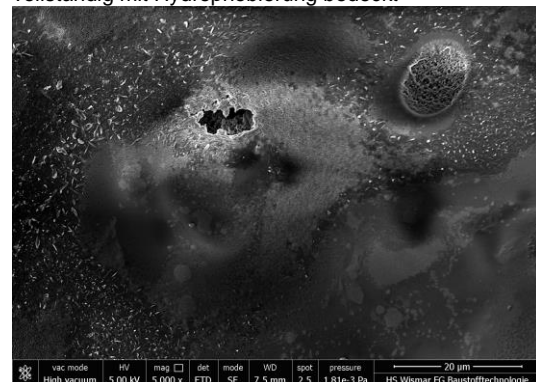
a) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar



b) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar: Oberfläche vollständig mit Hydrophobierung bedeckt



c) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar: Vollständige Auskleidung einer Großpore



d) Hydrophobierungsfilm deutlich erkennbar: Vollständige Auskleidung einer Großpore

Abbildung 59: a) bis d) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM:

Material =>M Ö R T E L , Quelle: Körber P.

In Abbildung 60 ist der Hydrophobierungsfilm auf einer Ziegelprobe exemplarisch farbig angelegt, um die Bedeckung des Injektionsmittels zu zeigen. Um in Bezug auf das Ergebnis in Abbildung 60 Aussagen zur Wirksamkeit des Injektionsmittels machen zu können, sind die Ergebnisse aus der ESEM- Betauung hinzuzuziehen. Beide Untersuchungsergebnisse zusammen im Vergleich mit einer Referenzprobe lassen Aussagen darüber zu, ob die Abdichtungsziele erreicht sind. In Abbildung 61a wird der Hydrophobierungsfilm einer Mörtelprobe im REM untersucht. Die Probe ist mit IM 2_DL bei einem $D_{(g)}$ von 30% behandelt: Die teilweise, lückenhafte Bedeckung mit dem Hydrophobierungsfilm ist deutlich erkennbar.

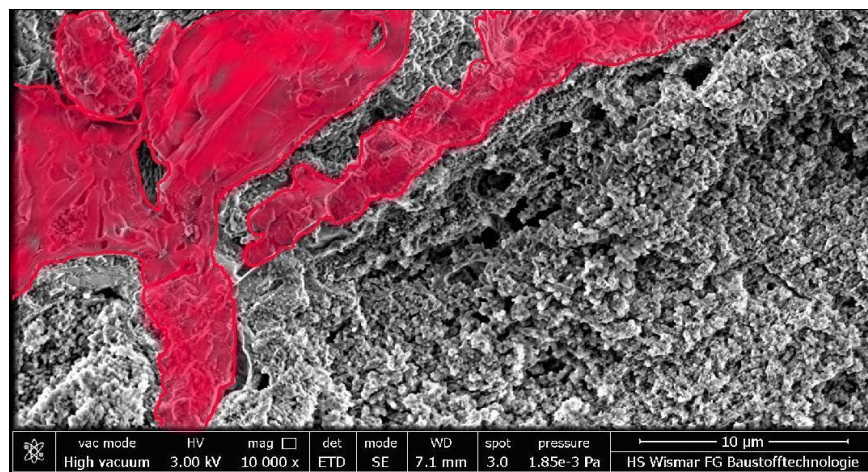
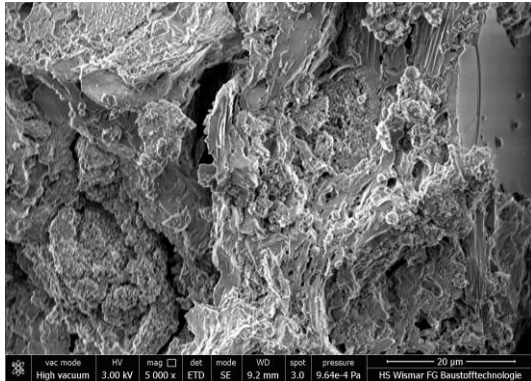
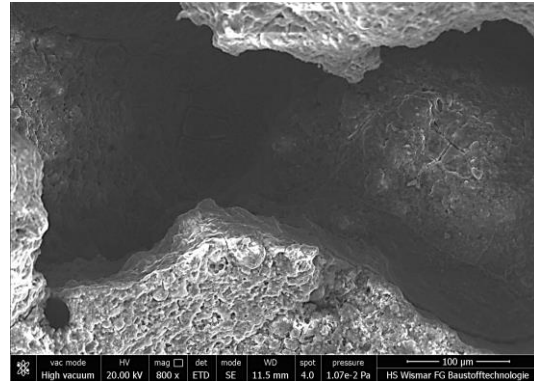


Abbildung 60: Untersuchung des Hydrophobierungsfilms im REM, exemplarisch:

Material =>ZIEGEL, Einfärbung des Hydrophobierungsfilms, Quelle: Körber P.



a)



b)

Abbildung 61: a) IM 2I_DL, D(g) 30% an einer Mörtelprobe => teilweise Bedeckung mit Hydrophobierungsfilm,
b) Ziegelprobe mit Hydrophobierungsfilm in der Pore, Quelle: Körber P.

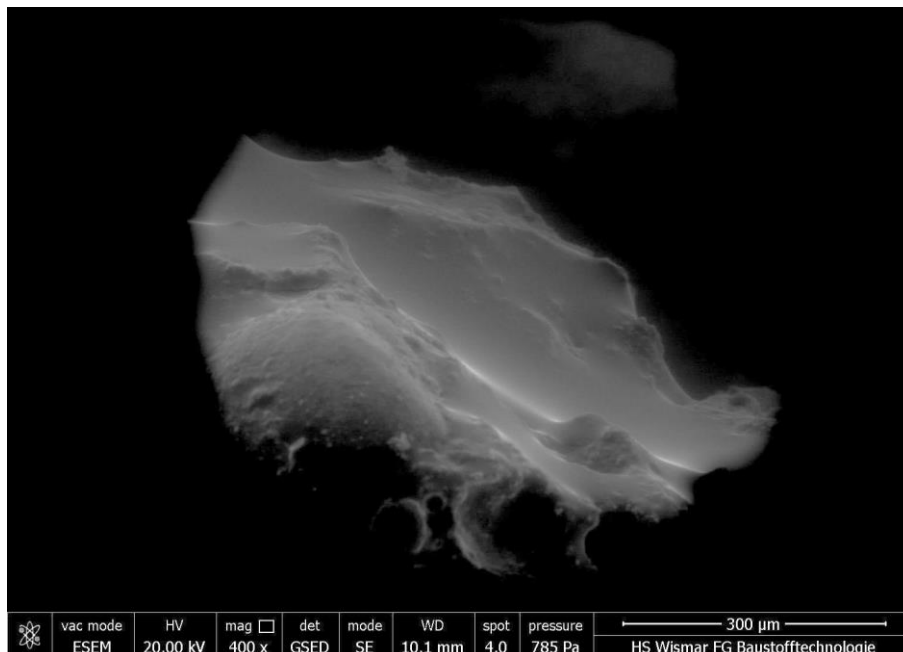
In Abbildung 61b ist der Hydrophobierungsfilm deutlich nachweisbar. Die Auskleidung der Pore ist gut erkennbar.

9.3 ESEM: Betauungen an Ziegel- und Mörtel- Proben

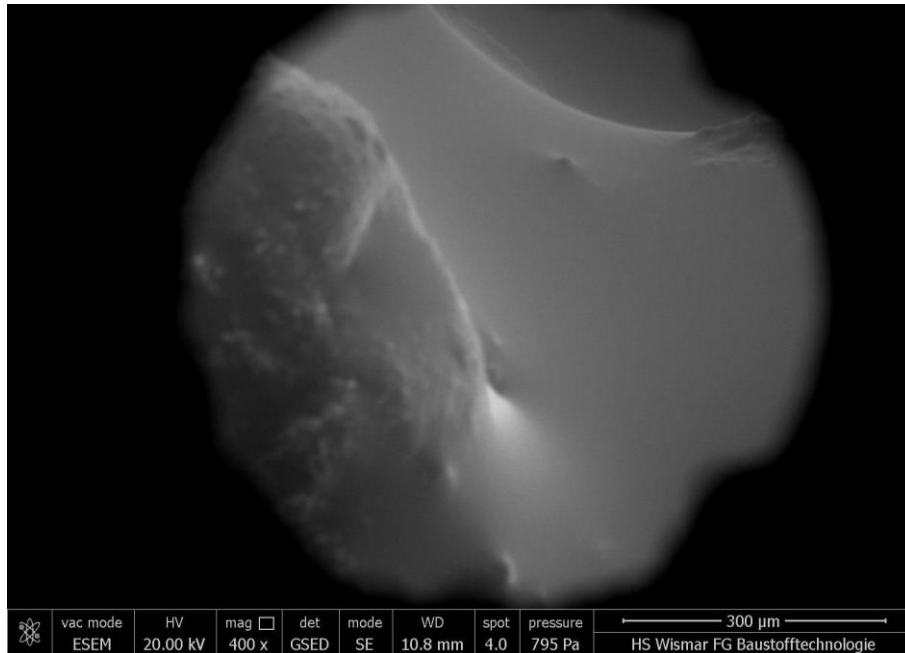
In 9.3 sind Beispiele für die im hiesigen Versuch durchgeführten Betauungsprozesse im ESEM an Ziegel- und Mörtel- Proben exemplarisch aufgeführt. Zur Veranschaulichung sind zudem in 9.3.1 bis 9.3.4 Betauungen von hydrophilen, hydrophoben und super hydrophoben Proben exemplarisch aufgeführt. Das in den Untersuchungen im ESEM zugeführte Medium war Wasser.

9.3.1 ESEM- Betauung: Hydrophil => Wasserfilm- Bildung

In Abbildung 62 ist eine Wasserfilmbildung, die sich in kürzester Zeit im ESEM auf der Probe eingestellt hat, exemplarisch dargestellt. Es handelt sich um ein hydrophiles Probenmaterial mit einem Kontaktwinkel von 0° . Es ist keine Tropfenbildung nachweisbar.



a)

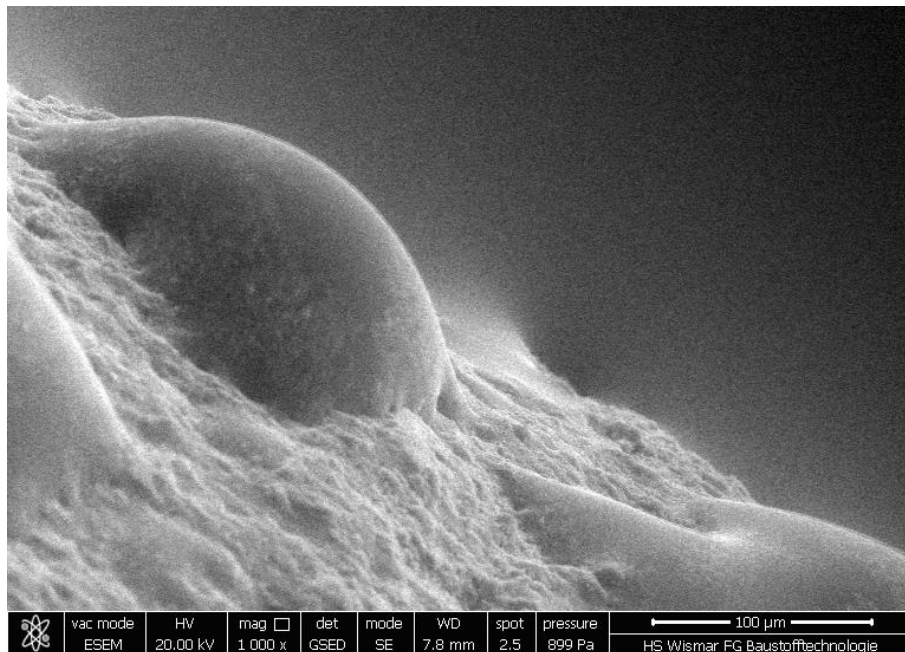


b)

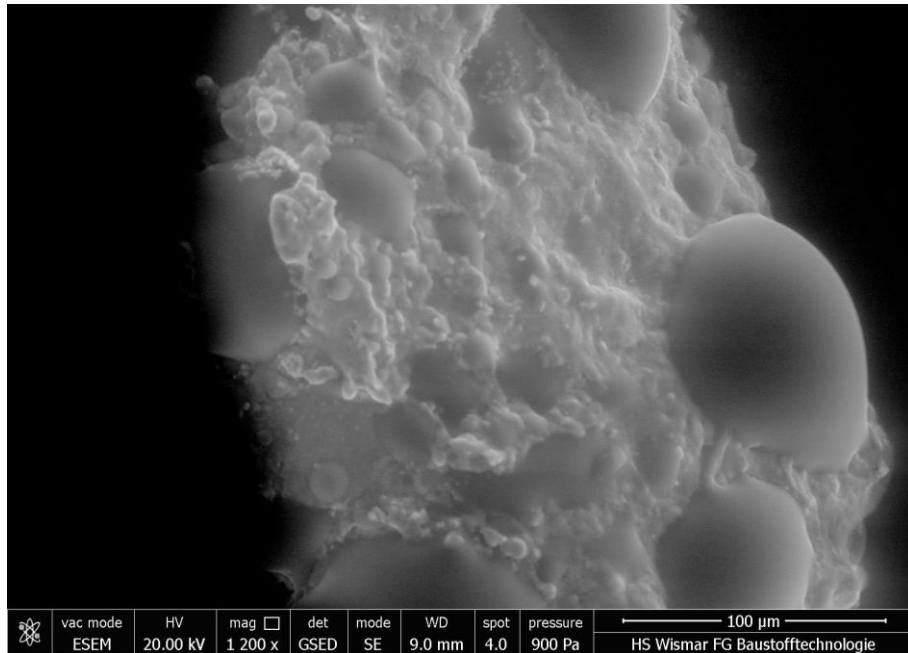
Abbildung 62: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => sofortige Wasserfilmbildung
=> keine Tropfenbildung nachweisbar, Quelle: Körber P.

9.3.2 ESEM- Betauung: Hydrophil => Tropfenbildung < 90°

In Abbildung 63 ist eine Tropfenbildung mit einem sehr flachen Winkel exemplarisch aufgeführt. Der Kontaktwinkel ist groß genug um die sofortige Wasserfilmbildung zu vermeiden und eine Tropfenbildung zu ermöglichen. Dennoch handelt es sich hier um einen hydrophilen Kontaktwinkel, deutlich unterhalb von 90°.



a)

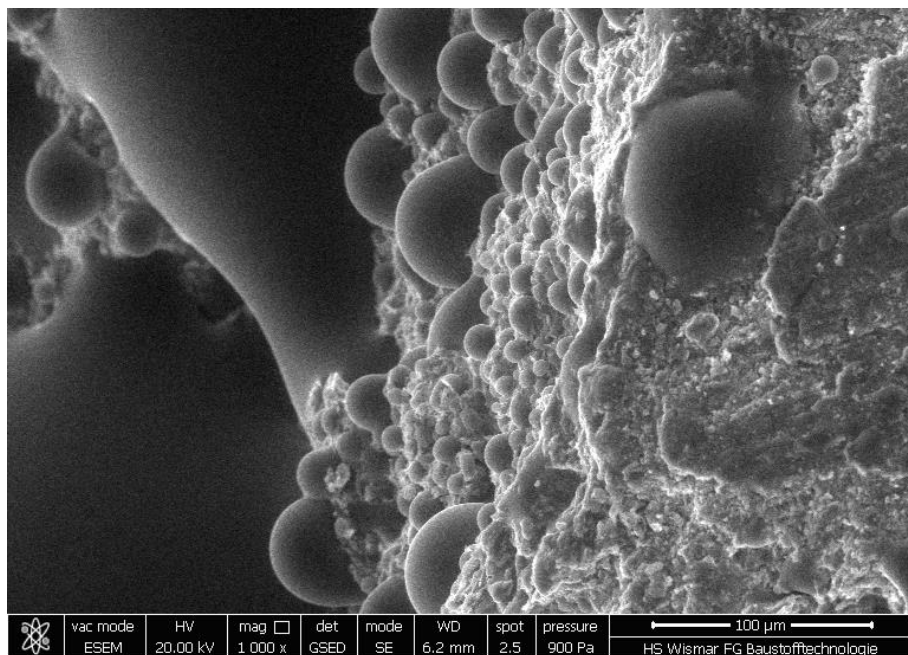


b)

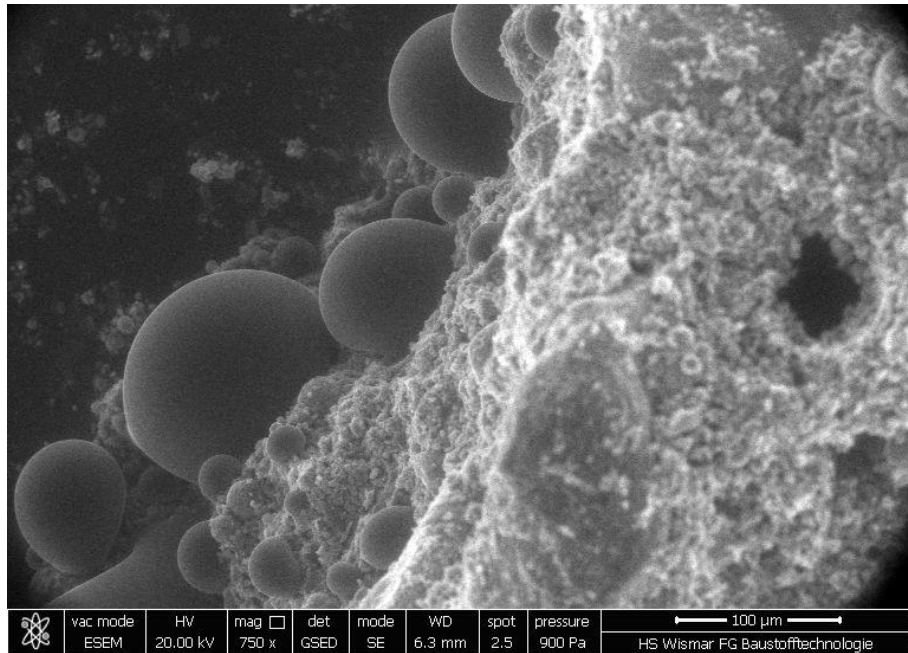
Abbildung 63: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil
=> Tropfenbildung deutliche unter 90° , Quelle: Körber P.

9.3.3 ESEM- Betauung: Hydrophob => Tropfenbildung $> 90^\circ$

In Abbildung 64 und Abbildung 65 ist eine Tropfenbildung mit einem Winkel $> 90^\circ$ exemplarisch aufgeführt. Die Tropfenform und die Kontaktwinkel belegen, dass es sich hier um hydrophobe Proben handelt. Der Kontaktwinkel wird mit der ‚Geometrischen Tropfen- Kontur- Analyse‘ gemessen, siehe 9.3.7

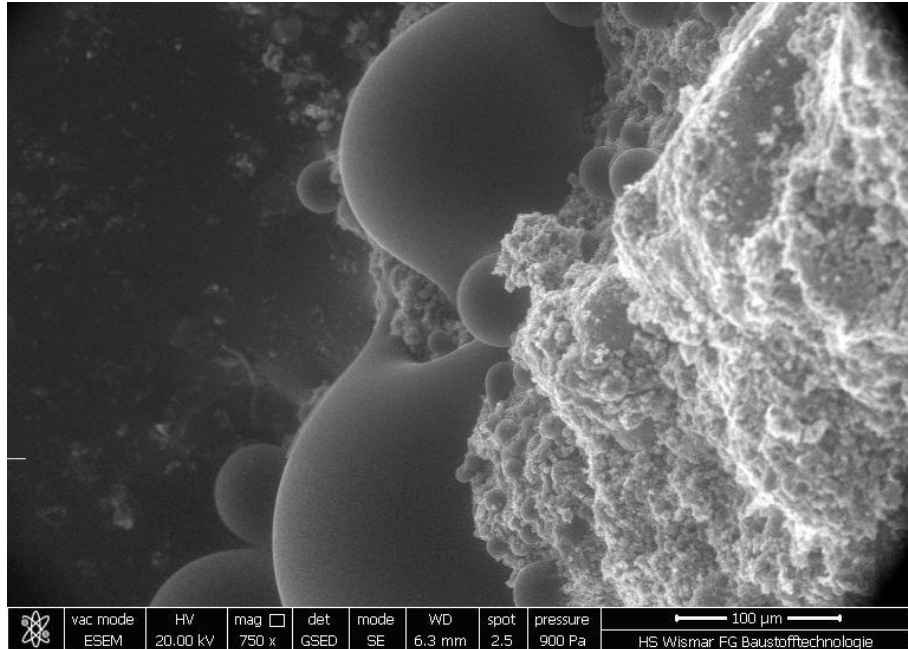


a)

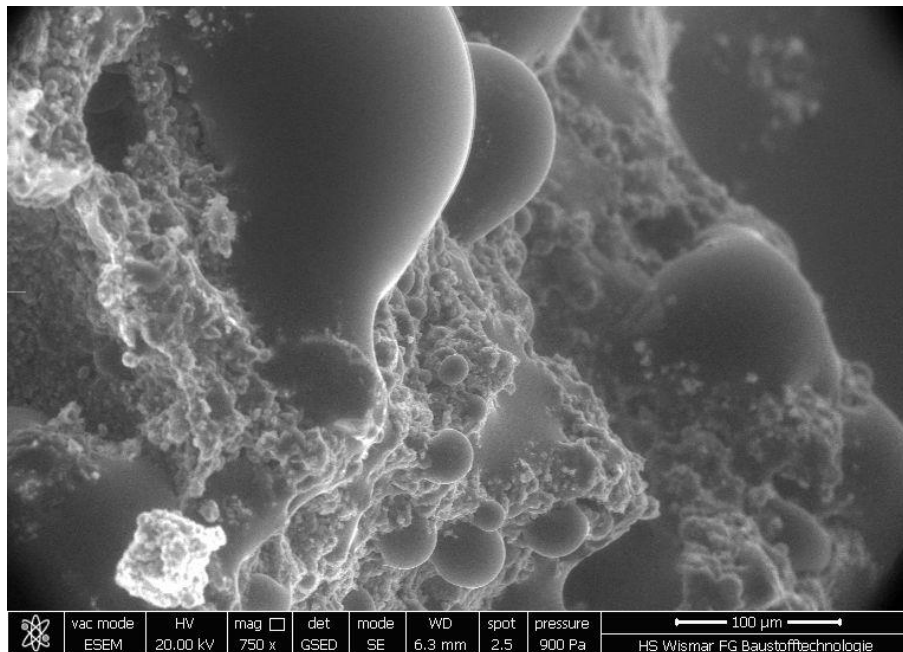


b)

Abbildung 64: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel/ Mörtel, hydrophob
=> Tropfenbildung > 90°, Quelle: Körber P.



a)



b)

Abbildung 65: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel/ Mörtel,
hydrophob => Tropfenbildung > 90°, Quelle: Körber P.

9.3.4 ESEM- Betauung: Superhydrophob => Tropfenbildung > 150°

Die Abbildung 66 zeigt eine kugelförmige Tropfenbildung. Es handelt sich um eine superhydrophobe Oberfläche mit einem Kontaktwinkel > 150°.

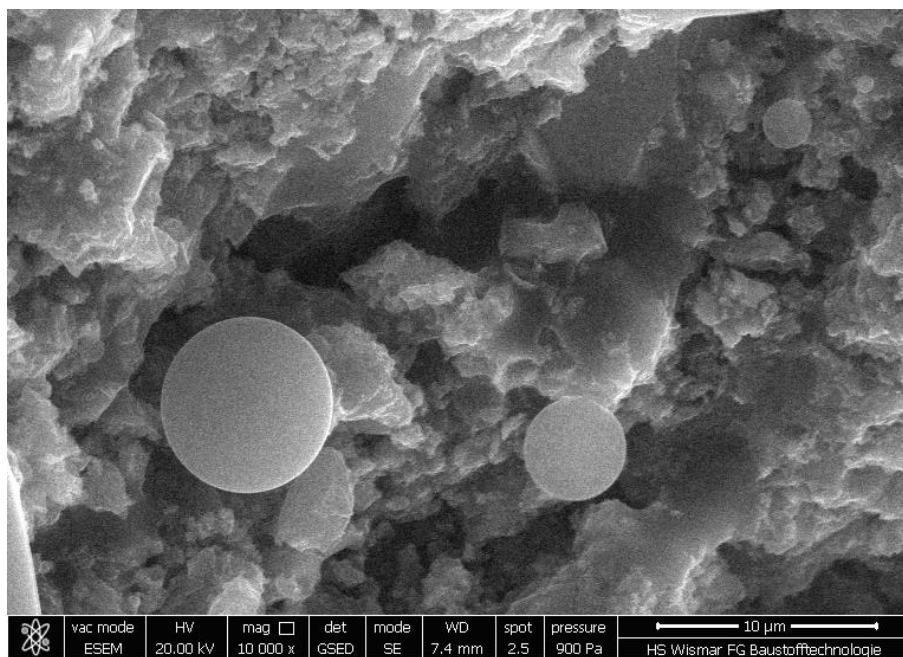


Abbildung 66: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, superhydrophob
=> Tropfenbildung > 150°, Quelle: Körber P.

9.3.5 ESEM- Betauung: Hydrophil => Wasserfilmbildung

Abbildung 67 zeigt eine Wasserfilmbildung. Auf Grund der hydrophilen Eigenschaften des Festkörpers wird die Tropfenbildung verhindert. Zwischen den einzelnen Bildern besteht ein Zeitunterschied von 5 Sekunden. Es besteht ein Kontaktwinkel von 0° .

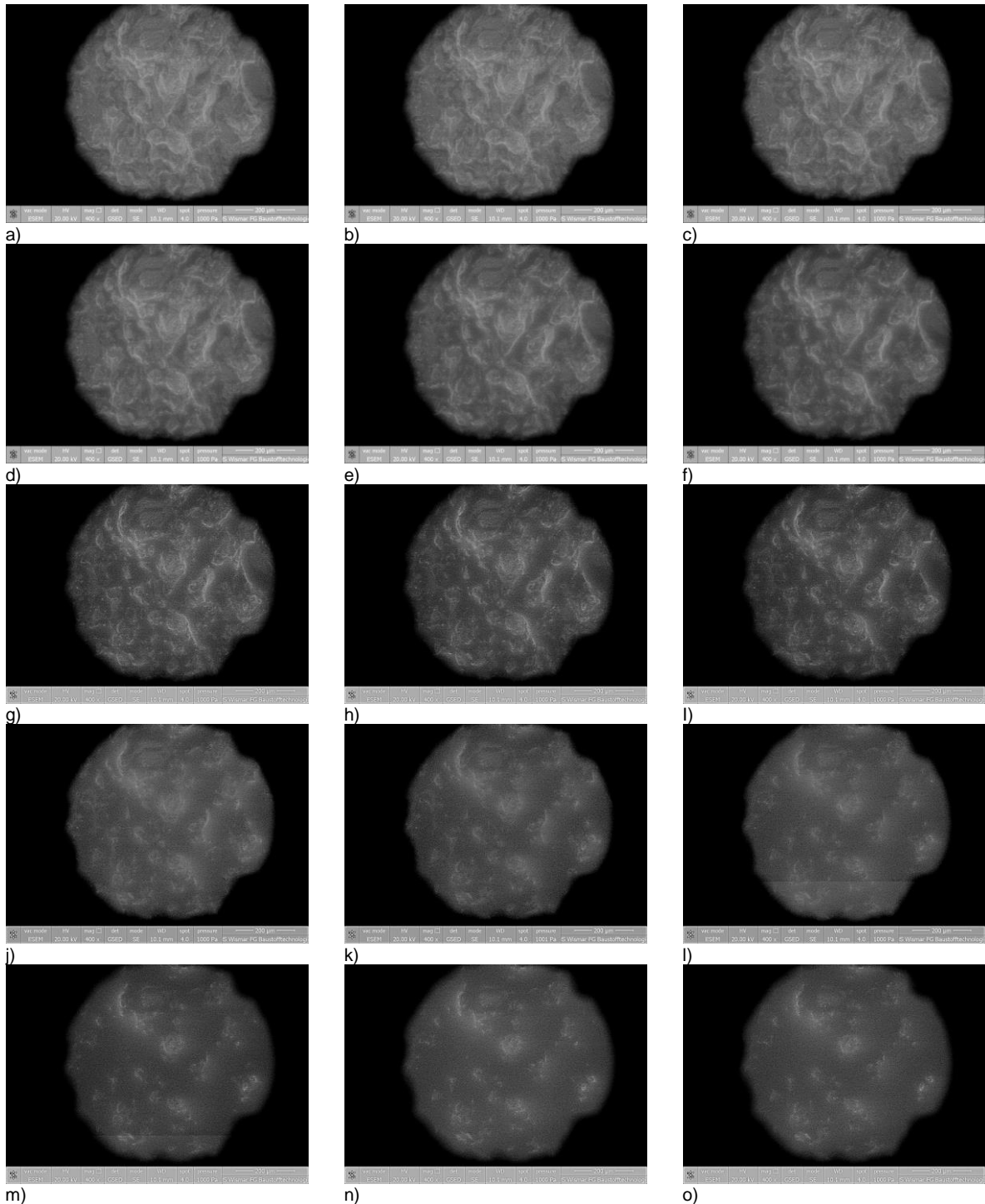


Abbildung 67: a) bis o): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung, Die Bilder sind im 5-Sekunden Takt geschossen, Tropfenbildung ist nicht möglich, Quelle: Körber P.

Abbildung 68 zeigt entstehende Tropfen in sehr flacher Form, die sich nicht halten können und zügig zu einem Wasserfilm vereinigen. Zeitabstand zwischen den Bildern: 5 Sekunden. Es besteht ein Kontaktwinkel von annähernd 0°.

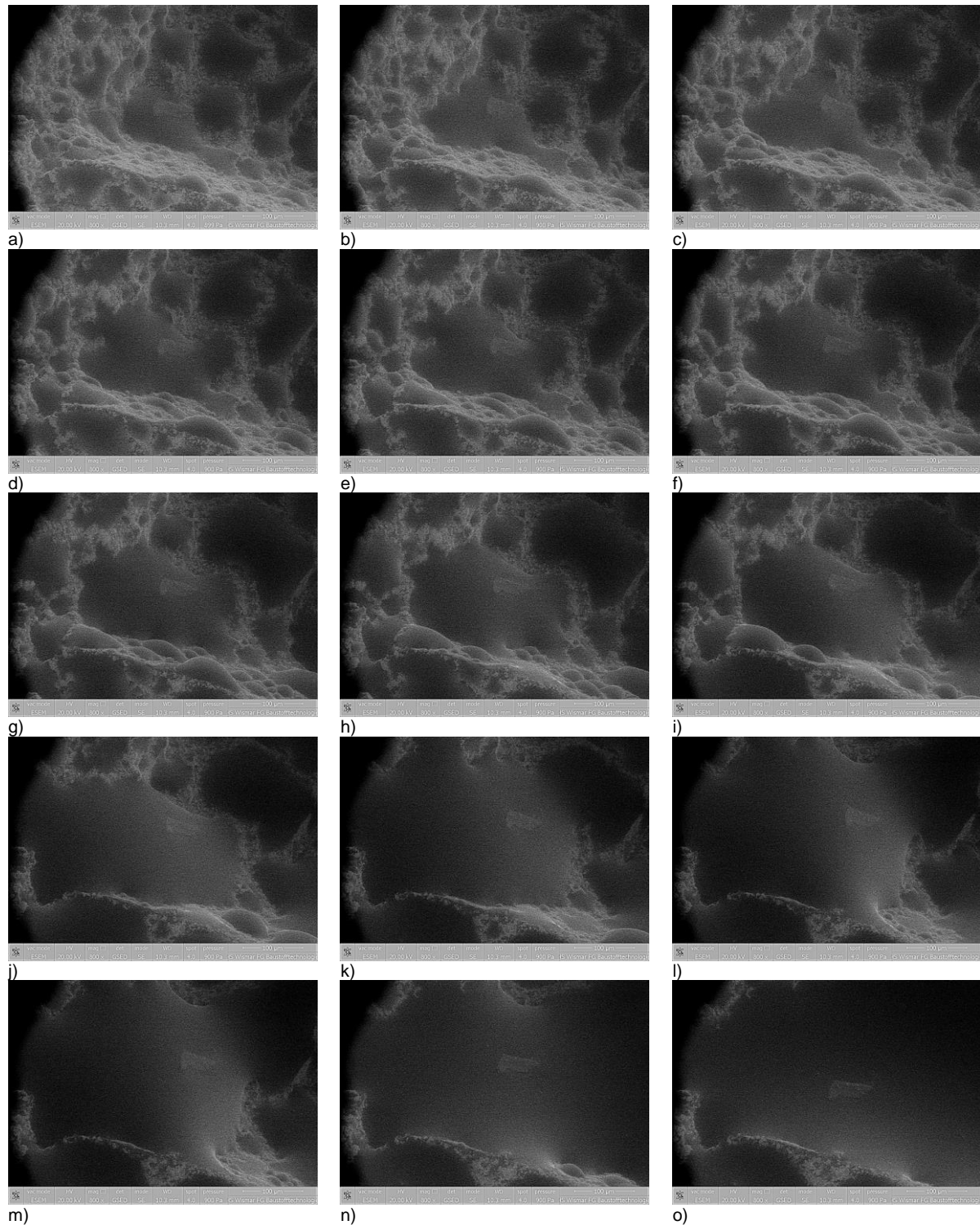


Abbildung 68: a) bis o): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil =>Wasserfilmbildung, Die Bilder sind im 5-Sekunden Takt geschossen, entstehende Tropfen vereinigen sich zügig, Quelle: Körber P.

Abbildung 69 zeigt eine unmittelbare Wasserfilmbildung mit einem Bild-Takt von 5 Sekunden.

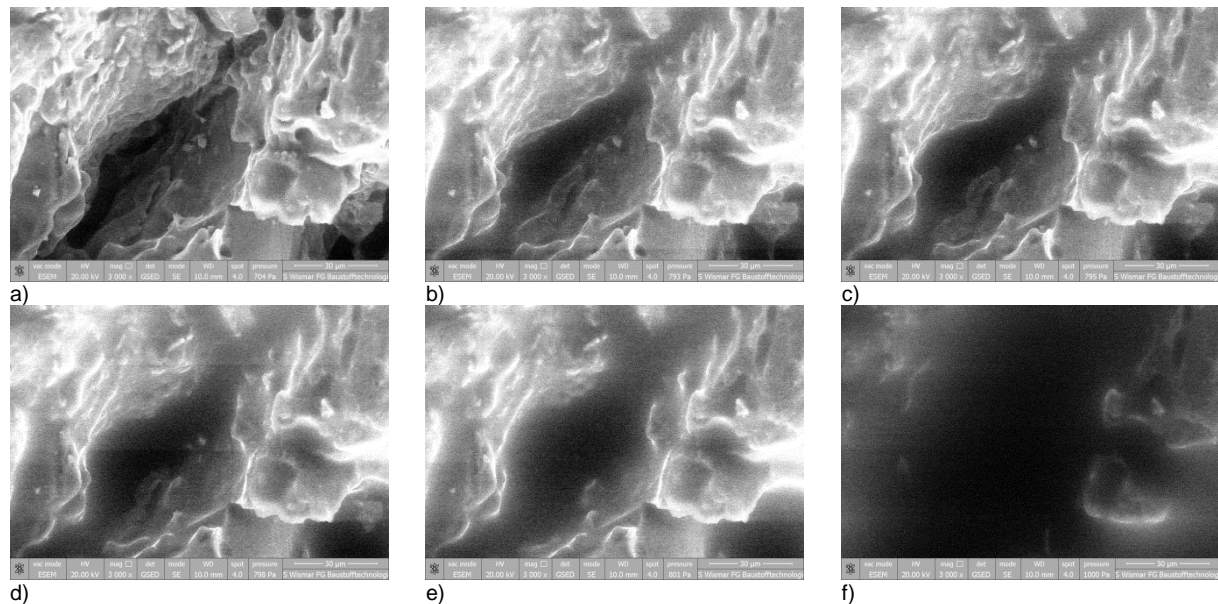


Abbildung 69: a) bis f): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung, Quelle: Körber P.

9.3.6 ESEM- Betauung: Hydrophob => Tropfenbildung > 90°

Abbildung 70 zeigt die Dynamik des Tropfenentstehungsprozesses. Die einzelnen Phasen des Heranreifens der Tropfen können beobachtet werden. Entstehende Tropfen wachsen in einem bestimmten Zeitraum heran und verbinden sich mit naheliegenden angrenzenden Tropfen zu größeren Tropfen, die wiederum weiter anwachsen und zum Teil zerplatzen. Es entstehen in dem frei werdenden Feld sofort neue Tropfen. Analog zu Abbildung 41 in 4.3.2.2 kann hier nachvollzogen werden, dass die Tropfen in ihrer Frühphase zunächst flache Winkel ausbilden, während in der Heranreifung und im Endstadium größere Kontaktwinkel ausgebildet werden. Zudem wird die Tropfenbildung im ESEM immer an den Flanken eines Probestücks, die dem Kühtisch nahe liegen, beobachtet. Es handelt sich daher immer um geneigte, oder sogar senkrechte Flächen der Probe. Daher können die Tropfen gemäß 4.3.2.2 Fortschritt- und Rückzugswinkel besitzen und nach der Reifung von der Probenoberfläche abrutschen. Diese Umstände müssen bei der Auswertung der Kontaktwinkel Berücksichtigung finden.

Der hier dargelegte Tropfen- Entstehungsprozess ist der Tatsache geschuldet, dass die Tropfenbildung unter dem Versuch durch einen leicht erhöhten Druck andauert. Die entstehenden Tropfen können nicht statisch bleiben, da sie aufgrund der geschaffenen und überreizten Bedingungen im ESEM weiter anwachsen. Hierdurch kommt es zur Reifung und schließlich zur Vereinigung einzelner Tropfen. In der Analyse ist zudem erkennbar, dass die Tropfen einen WENZEL- Kontaktwinkel ausbilden, siehe dazu Abbildung 41 und Abbildung 42.

Es ist daher unerlässlich die Kontaktwinkelmessung ausschließlich an den reifen Tropfen durchzuführen. In dieser Arbeit wurden die Kontaktwinkel, der im ESEM erzeugten reifen Tropfen, mit der hier entwickelten ‚Geometrischen Tropfen- Kontur- Analyse‘ auf Basis eines geometrischen Tropfenkonturmodells gemessen, siehe dazu Abbildung 43.

Die Bilder in Abbildung 70 sind bei folgenden stationären Bedingungen im ESEM entstanden:

- Klima in der Kammer: 100% Relative Luftfeuchte
- Temperatur des Kühtisches: 2° C
- Druck in der Kammer: 1.050 Pa

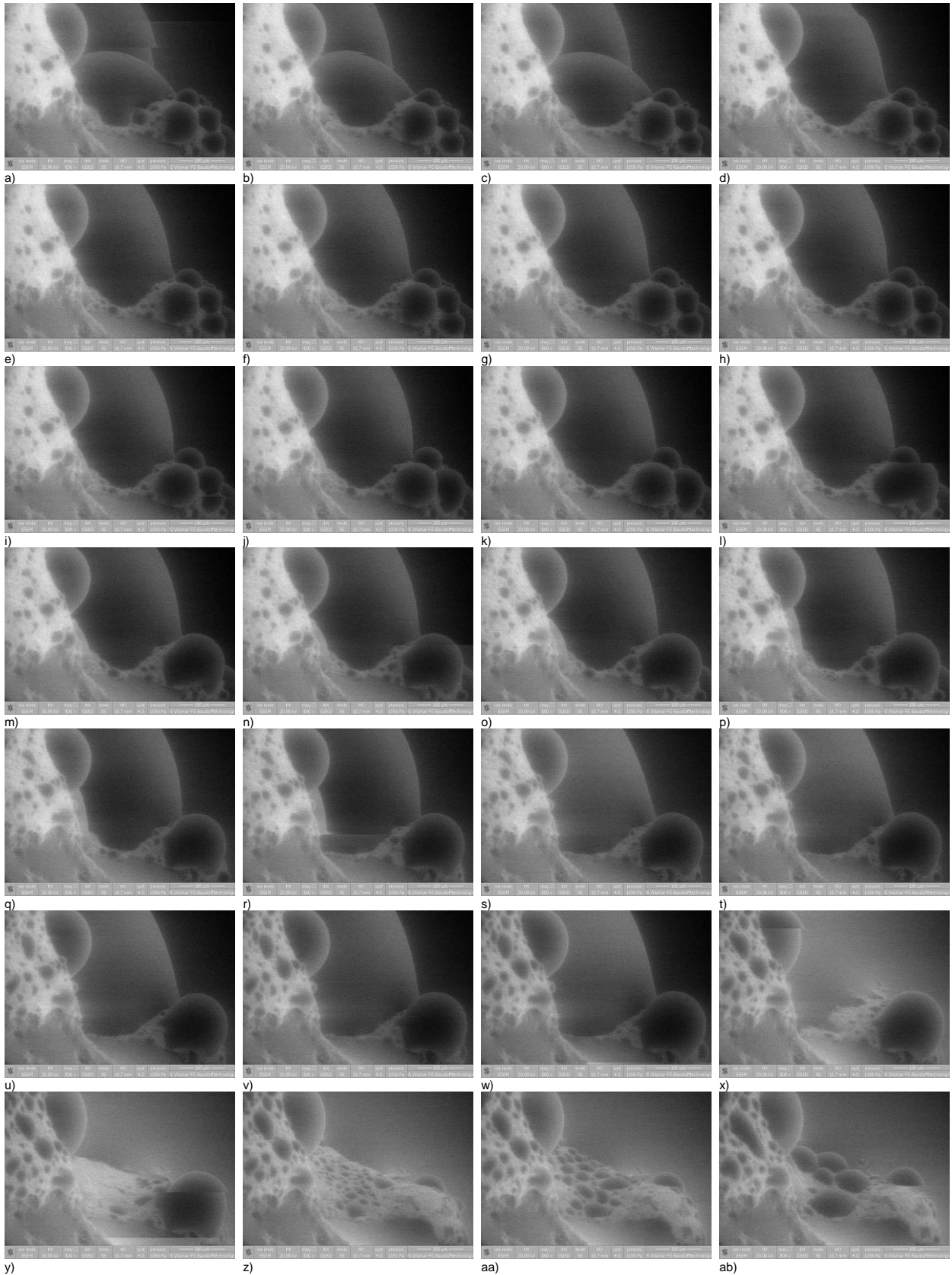


Abbildung 70: a) bis ab): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophob
=>Tropfenbildung, Quelle: Körber P.

9.3.7 ESEM- Betauung: Kontaktwinkel Messung mit der Geometrischen Tropfen- Kontur- Analyse

Die Kontaktwinkelmessungen im ESEM erfolgen im dreidimensionalen Raum. Daher ist ein geometrisches Modell für die Messungen erforderlich. Es ist erforderlich die Kontur der Tropfen zu erfassen, ähnlich wie beim Tropfenkonturverfahren, siehe Abbildung 43. Im nächsten Schritt kann an dem dreidimensional erfassten Tropfen eine zweidimensionale Tangentenmessung durchgeführt werden. Die Kontaktwinkelmessung kann direkt im ESEM oder nachträglich erfolgen, siehe dazu Abbildung 71. Im ESEM, das vorliegend eine dynamische Tropfenbildung besitzt, müssen die reifen Tropfen gemessen werden. Liegt ein Tropfen derart auf der Feststoff- Oberfläche, dass eine Tropfen- Seitenansicht besteht, kann der Kontaktwinkel des Tropfens direkt im ESEM oder im ESEM- Bild gemessen werden, siehe Abbildung 71. Liegt der Tropfen auf einer schiefen und gedrehten Ebene, so ist der Tropfen perspektivisch zu sehen. Für einen solchen Fall wurde in dieser Arbeit die ‚Geometrische Tropfen- Kontur- Analyse‘ in Abbildung 72 entwickelt. Es handelt sich um ein Verfahren, das auf dem ‚Höhen-Breiten-Verfahren‘ aufbaut, siehe dazu Abbildung 43. Die Ermittlung der Winkel geschieht jedoch vorliegend geometrisch. Zur Durchführung der Geometrischen Tropfen-Kontur-Analyse macht man sich die Tatsache zunutze, dass ein Tropfen in seiner Idealform aus einem Kugelsegment besteht. Die Kontur des Kugelsegments entspricht auch in der Perspektive der 2-Dimensionalen Kontur eines Kugelabschnitts. Das idealisierte Kugelsegment besitzt als Grundfläche eine Kreisscheibe (=Kreisumriss). Wird dieser Kreisumriss perspektivisch, idealisiert in das im ESEM erzeugte Bild eingetragen, so schneidet sich der Kreisbogen mit dem Bogen der Tropfenkontur. In den Schnittpunkten beider Bögen kann die Grundlinie angetragen werden. Nachdem das Bild gedreht und auf die Grundlinie ausgerichtet ist, kann der Kontaktwinkel an dem Kreisbogen der Tropfenkontur über der Grundlinie 2-dimensional im Tangentenverfahren gemessen werden. Bei der ‚Geometrischen Tropfen- Kontur- Analyse‘ wird ein idealisiertes Modell des Tropfens ohne Delleneffekte und unter Idealisierung der Feststofftopographie zugrunde gelegt. Auf Grund der Idealisierung und auf Grund der Messtoleranzen muss für dieses Modell daher eine Toleranz berücksichtigt werden. Die Toleranz der Geometrische Tropfen- Kontur- Analyse wird hier mit 3° angesetzt. Für die Anwendung in der Nachweisführung der Wirksamkeit von Injektionsmitteln ist eine Toleranz von 3° sachgerecht und vertretbar.

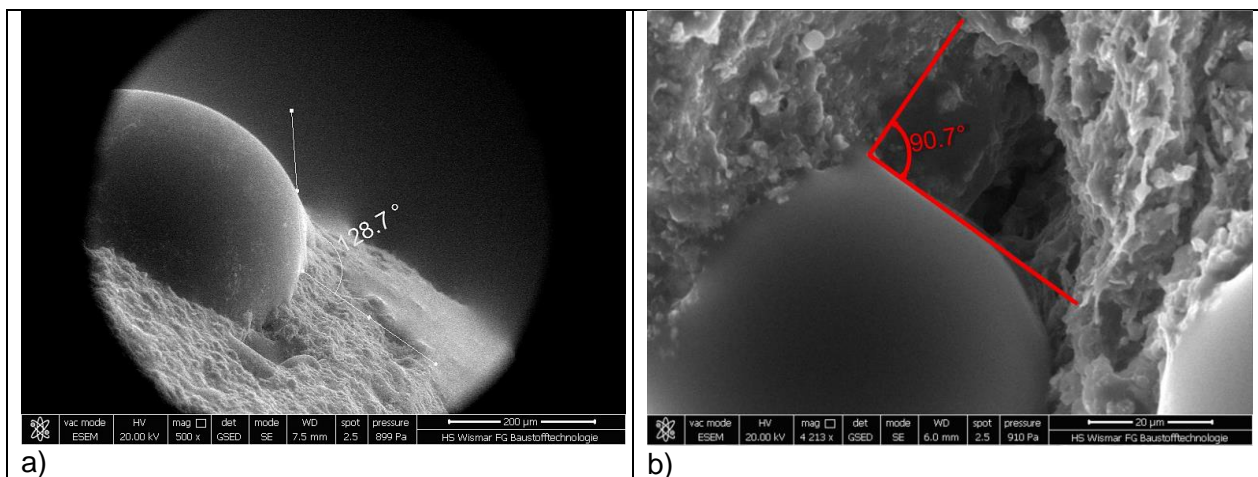


Abbildung 71: Direkte Messung des Kontaktwinkels a) im ESEM ($180^\circ - 128,7^\circ \Rightarrow 51,3^\circ$)

b) im ESEM- Bild ($180^\circ - 90,7^\circ \Rightarrow 89,3^\circ$), Quelle: Körber P. [ANLAGE 15 a - d]

Bei der Kontaktwinkelmessung im ESEM muss häufig an schiefen Ebenen gemessen werden. Es können daher Tropfen, die sowohl einen Fortschritt- als auch einen Rückzugswinkel besitzen vorliegen. Zunächst muss die Messung grundsätzlich an reifen Tropfen erfolgen. Für den hiesigen Anwendungsfall wird in einem vereinfachten Modell verfahren, dass beide Winkel (Fortschritt- und Rückzugswinkel) erfasst werden. Im nächsten Schritt werden beide Winkel addiert und deren Summe halbiert. Auf diese Weise wird der mittlere Kontaktwinkel erfasst. Bei diesem idealisierten Modell wird unterstellt, dass die beiden Winkel in gleichem Maße (der eine negativ und der andere positiv) von dem etwaigen ungestörten Kontaktwinkel abweichen.

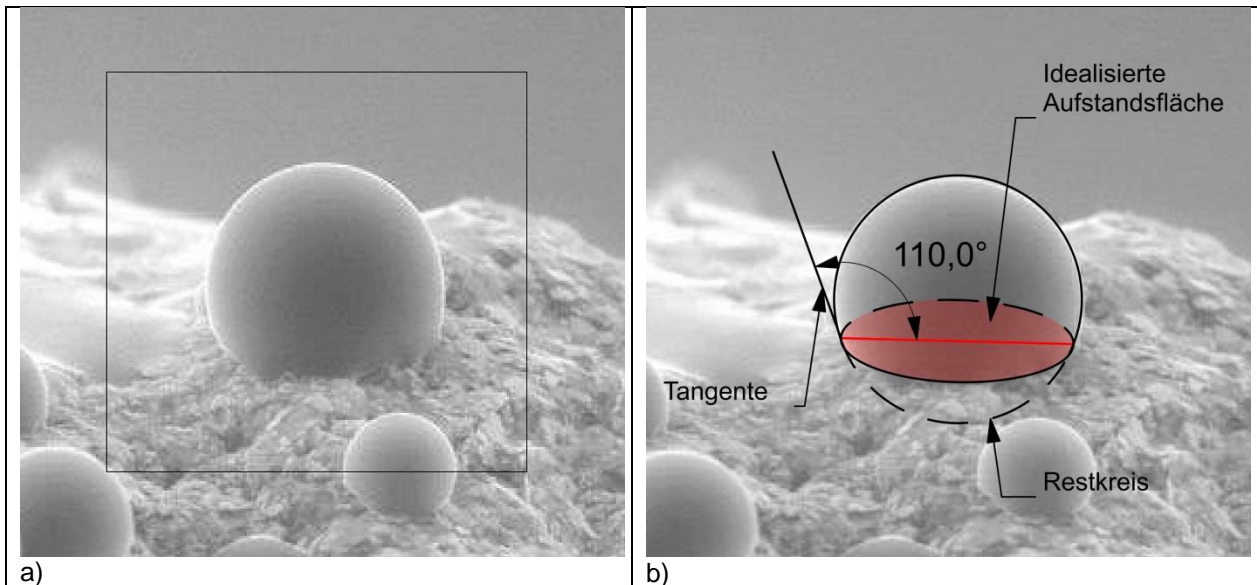


Abbildung 72: a) & b) Geometrische- Tropfen- Kontur- Analyse und Tangentenverfahren, Quelle: Körber P.

10. RECHNERISCHE MODELLIERUNG

10.1 Beziehung Kontaktwinkel => W-Wert / Faktor $A \cdot \sqrt{t}$

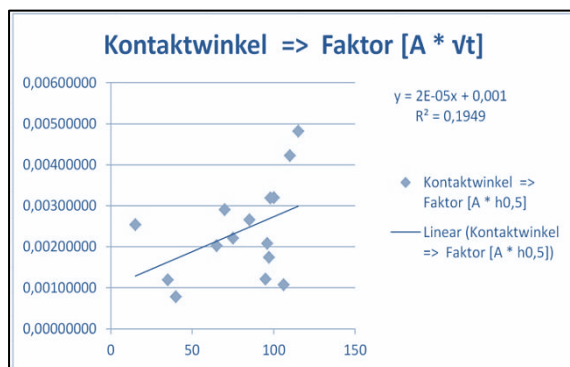
Zur rechnerischen Modellierung wurden lineare Funktionen verwendet. Anhand der im Stufe 1 gewonnenen Daten können, unterschieden nach dem jeweiligen Injektionsmittel, Faktoren für die Beziehungen zwischen Kontaktwinkel und w- Wert, sowie für die fiktiven Wassergehalte ermittelt werden. Abbildung 73 und Abbildung 74 zeigen das rechnerische Modell exemplarisch anhand der Proben IM 2_DL_V.

$$y = m \cdot x + n$$

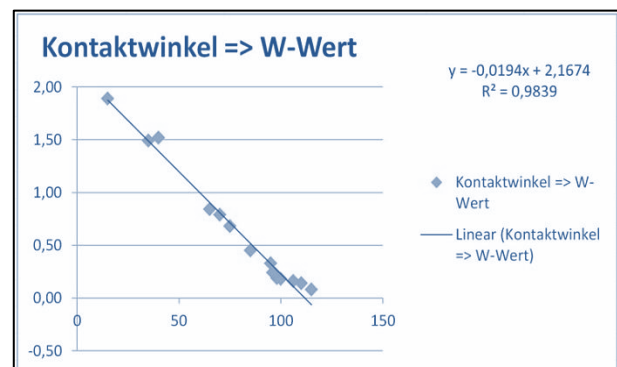
$$\text{Steigung } [m] = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$n = y \cdot \text{Kehrwert } (m \cdot x)$$

Formel 15: Für die rechnerische Modellierung verwendete Lineare Funktionen



a)



b)

Abbildung 73: a) & b): Proben IM 2_DL_V: Beziehungen Kontaktwinkel zu => Faktor $[A \cdot \sqrt{t}]$ => w-Wert, makroskopisch, ausgedrückt in linearen Funktionen, Quelle Körber P.

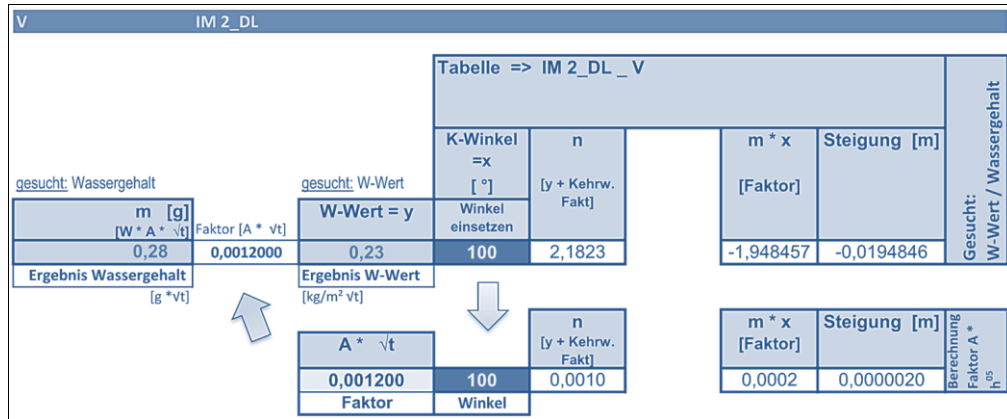


Abbildung 74: Grundlage für die rechnerische Ermittlung von w-Werten und Wassergehalten zugehörig zu den gemessenen ESEM-Kontaktwinkeln am Beispiel IM 2_DL_V, Quelle: Körber [Anlage 16 a – m]

Messprogramm ESEM II

| Probe | RH [%] | ESEM Messwert [°] | m [g] $[W \cdot A \cdot \sqrt{t}]$ | Faktor $(A \cdot \sqrt{t})$ | W-Wert $A \cdot \sqrt{t}$ | ESEM-Winkel einsetzen | n [y + Kehrw. Fakt] | $m \cdot x$ | Steigung [m] |
|--------------------|--------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|
| | | | | | | | | | |
| IM 2_DL V5 M02 A1 | 44% | 95,50 | 0,38 | 0,00119 | 0,32 | 95,50 | 2,1823 | -1,8607793 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V5 M04 A2 | 36% | 110,00 | 0,05 | 0,00122 | 0,04 | 110,00 | 2,1823 | -2,143306 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V5 M06 B1 | 62% | 64,00 | 1,06 | 0,00113 | 0,94 | 64,00 | 2,1823 | -1,2470144 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V5 M08 B2 | 60% | 68,00 | 0,97 | 0,00114 | 0,86 | 68,00 | 2,1823 | -1,3249528 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V1 M02 A1 | 100% | - | 2,18 | 0,00100 | 2,18 | - | 2,1823 | 0 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V1 M04 A2 | 100% | - | 2,18 | 0,00100 | 2,18 | - | 2,1823 | 0 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V1 M06 B1 | 65% | 60,00 | 1,13 | 0,00112 | 1,01 | 60,00 | 2,1823 | -1,169076 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V1 M08 B2 | 74% | 56,20 | 1,21 | 0,00111 | 1,09 | 56,20 | 2,1823 | -1,09503452 | -0,0194846 |
| IM 2_DL V1 M08 D1 | 100% | - | 2,18 | 0,00100 | 2,18 | - | 2,1823 | 0 | -0,0194846 |
| IM 3 Z29 M02 A1 | 80% | 34,00 | 4,00 | 0,00570 | 0,70 | 34,00 | 0,98 | -0,2788 | -0,0082 |
| IM 3 Z29 M04 A2 | 48% | 88,50 | 1,45 | 0,00570 | 0,25 | 88,50 | 0,98 | -0,7257 | -0,0082 |
| IM 3 Z29 M06 B1 | 96% | - | 5,59 | 0,00570 | 0,98 | - | 0,98 | 0 | -0,0082 |
| IM 3 Z29 M08 B2 | 100% | - | 5,59 | 0,00570 | 0,98 | - | 0,98 | 0 | -0,0082 |
| IM 3 A27 M02 A1 | 100% | - | 8,91 | 0,00550 | 1,62 | - | 1,62 | 0 | -0,0125 |
| IM 3 A27 M04 A2 | 100% | - | 8,91 | 0,00550 | 1,62 | - | 1,62 | 0 | -0,0125 |
| IM 3 A27 M06 B1 | 100% | - | 8,91 | 0,00550 | 1,62 | - | 1,62 | 0 | -0,0125 |
| IM 3 A27 M08 B2 | 100% | - | 8,91 | 0,00550 | 1,62 | - | 1,62 | 0 | -0,0125 |
| IM 2_DL A12 M02 A1 | 62% | 64,00 | 3,81 | 0,00550 | 0,69 | 64,00 | 1,23 | -0,5376 | -0,0084 |
| IM 2_DL A12 M04 A2 | 72% | 59,00 | 4,04 | 0,00550 | 0,73 | 59,00 | 1,23 | -0,4956 | -0,0084 |
| IM 2_DL A12 M06 B1 | 63% | 63,00 | 3,85 | 0,00550 | 0,70 | 63,00 | 1,23 | -0,5292 | -0,0084 |
| IM 2_DL A12 M08 B2 | 71% | 71,00 | 3,48 | 0,00550 | 0,63 | 71,00 | 1,23 | -0,5964 | -0,0084 |

Abbildung 75: Rechnerische Ermittlung von w-Werten und Wassergehalten zugehörig zu den ESEM-Kontaktwinkeln, gesamtes ESEM- Messprogramm des Stufe 2, Quelle: Körber P. [Anlage 17]

Mit den über die makroskopischen Versuche in Stufe 1 ermittelten Daten können für die im ESEM gemessenen Kontaktwinkel w -Werte und fiktive Wassergehalte errechnet und zugeordnet werden.

Abbildung 75 zeigt die Berechnung und die Ergebnisse des rechnerischen Modells. Den im ESEM gemessenen Kontaktwinkeln werden, differenziert nach dem jeweiligen Injektionsmittel, w -Werte und fiktive Wassergehalte zugeordnet. Auf diese Weise können die in Stufe 2 im ESEM gemessenen Kontaktwinkel mit den Daten der Stufe 1 korreliert werden. Die w -Werte drücken die veränderte Kapillarität des untersuchten Materials aus. Mit den fiktiven Wassergehalten kann in Zusammenhang mit den RH- Werten der Stufe 1a des Nachweisverfahrens eine Feuchtesimulation durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Simulation kann ein 3-dimensionales Bild von einer fiktiven Befeuchtung der Untersuchten Mauerwerksbereiche gezeigt werden.

Im Anwendungsfall kommt der 3-dimensionalen Auswertung der Ergebnisse eine große Bedeutung zu, da diese die tatsächlichen Schwachstellen der neuen Abdichtungsebene aufzeigen kann. Anhand dieser Simulation kann auch das Abdichtungsziel, ausgedrückt in einem von 100-Wert, hinterfragt werden.

Die zweite Stufe des Nachweisverfahrens beruht auf der Auswertung der rechnerisch ermittelten w -Werte. Diese Werte können den, in tiefengestapelten Messachsen entnommenen Proben zugeordnet werden. Auch hier entsteht ein, auf das Messfenster bezogenes, 3-dimensionales Bild von der veränderten Kapillarität. Die Auswertung erfolgt gemäß der in Abbildung 35 aufgeführten Tabelle nach DIN EN 15148 / DIN EN 1062.

Abbildung 76 zeigt die rechnerisch anhand der ESEM- Kontaktwinkel ermittelte w - Werte und fiktiven Wassergehalte für das Messprogramm der Stufe 2. Dabei wurden die Ergebnisse für die w -Werte und die Wassergehalte rechnerisch anhand von linearen Funktionen errechnet.

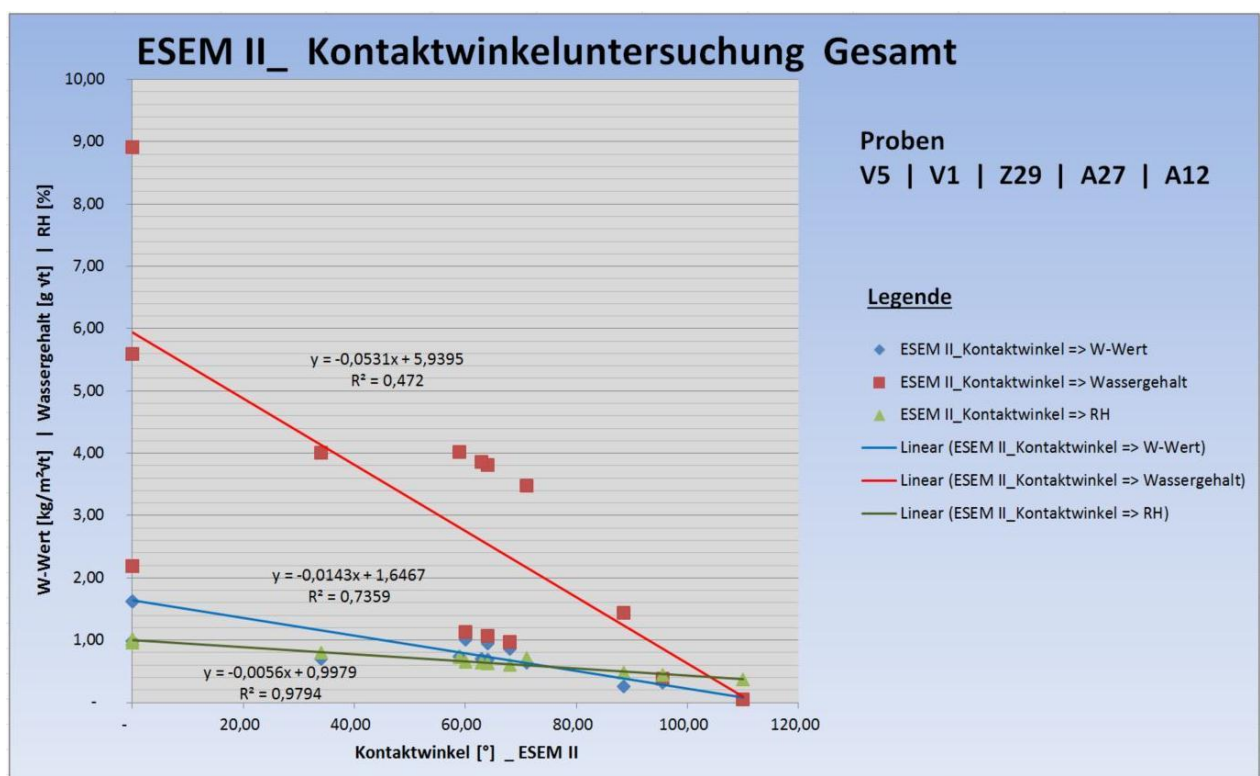


Abbildung 76: Beziehungen Kontaktwinkel =>w-Wert / =>Wassergehalt / =>RH- Wert, gesamtes ESEM- Messprogramm, Quelle: Körber P. [Anlage 18]

11. REFLEKTION ZU DEN 4 EINGANGS- THESEN

11.1.1 **These 1:** Auf Grund von Anomalien im Baustoff und im Mauerwerk sind Labor- Reihenuntersuchungen zur Kapillarität von, mit Injektionsmitteln behandelten Baustoffen, analog zur WTA- Zertifizierung allein nicht aussagefähig. Es sind zudem Qualitäts- und Wirksamkeitsnachweise an Proben vom Objekt erforderlich.

In der Vergangenheit wurden Injektionsmittel zur nachträglichen Bauwerksabdichtung vielfach ohne fundierte Mauerwerksdiagnostik, ohne Kenntnisse des Umfelds und zum Teil ohne ausreichende Kenntnisse über das einzusetzende Mittel verwendet. Der Abdichtungserfolg wurde selten professionell kontrolliert und ebenso selten dokumentiert. Es herrscht im Kreise der Verarbeiter die Auffassung, dass der Nachweis des Abdichtungserfolgs nicht Bestandteil des Auftrags sei. Damit wird faktisch eine Gleichschaltung aller anwendbaren Injektionsmittel, der Anwendungsarten und der Anwendungsorte von Injektionsmittel- Abdichtungen betrieben. Die in der Praxis abzudichtenden Mauerwerke sind aber so verschieden wie die Injektionsmittel- Produkte, die zur Abdichtung zur Verfügung stehen. Eine zufällige Wahl eines Injektionsmittels zum Einsatz an einem unbekanntem Mauerwerk kann nur zufällig zum Erfolg führen. Derzeit stehen rund 150 Injektionsmittel zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung zur Verfügung. Bevor ein Injektionsmittel zur nachträglichen Abdichtung ausgewählt wird, müssen zunächst die örtlichen Bedingungen, das zu sanierende Mauerwerk und der zu erwartende Abdichtungserfolg differenziert betrachtet und beschrieben werden. Vielfach wird eine Querschnittsabdichtung, bestehend aus Injektionsmitteln im Zusammenhang mit weiteren Sanierungsschritten ausgeführt. Hierbei ist es entscheidend, dass alle Sanierungsmaßnahmen aufeinander abgestimmt werden und dass „in einem System“ gearbeitet werden kann. Die derzeit bestehenden Nachweisverfahren für den Injektionsmitteleinsatz sind in 3.1 und 3.2 beschrieben. Im Wesentlichen basieren die bestehenden Verfahren auf laborgestützte Nachweise an laborseits erstellten großen Prüfkörpern, die auf makroskopischen Untersuchungen beruhen. Diese Verfahren haben eine sehr lange Messdauer. Zudem besteht das Zertifizierungsverfahren nach WTA [66]. Dieses Verfahren kann nur Aussagen über die grundsätzliche Wirksamkeit eines Injektionsmittels machen, da quasi Norm- Prüfkörper verwendet werden. Es besteht insoweit bis dato kein Nachweisverfahren, das den Injektionsmitteleinsatz am Objekt mit schnellen und präzisen Ergebnissen anhand kleiner Proben überprüfen kann. Neuere wissenschaftliche Studien und Veröffentlichungen weisen jedoch nach, dass auf Grund von Anomalien in der Konstruktion und im Baustoff selbst, Ergebnisse der oben aufgeführten Labor- Reihenuntersuchungen nicht ohne weiteres auf den Injektionsmitteleinsatz an einem konkreten Objekt übertragen werden können. Häufig anzutreffende Anomalien im Mauerwerk können in Rissen bestehen, an denen etwaig große Mengen des Injektionsmittels ungeplant abgeleitet werden und somit die geplante Ausbreitung des Injektionsmittels nicht erreicht werden kann. Zudem wird bereits seit einigen Jahren in der Fachliteratur auf die Gefahren einer etwaigen Hohlräumigkeit des Mauerwerks hingewiesen. Eine weitere Problematik besteht in der Durchfeuchtung des zu behandelnden Mauerwerks. Es ist insoweit bereits nachgewiesen, dass die Bohrlochabstände bei Bohrlochketten zur Injektionsmittel-Anwendung keinesfalls immer gleich zu wählen sind, wie die WTA- Merkblätter dieses vorgeben. Es bestehen in diesem Zusammenhang Korrelationen zwischen dem Durchfeuchtungsgrad $[D_{(g)}]$ des Mauerwerks und dem zu wählenden Bohrlochabstand. Wählt man dennoch undifferenziert und ohne Berücksichtigung des Durchfeuchtungsgrades den in der WTA [66] derzeit empfohlenen Bohrlochabstand, kann unter Umständen der angestrebte Abdichtungserfolg nicht erreicht werden. Der beabsichtigte abdichtende „Balken“ ist dann im Mauerwerk schlicht mit Fehlstellen und Inselbildungen behaftet. Die erfolgreiche Anwendung eines Injektionsmittels ist von der Wirksamkeit des Mittels selbst, von dessen Ausbreitung im Wandquerschnitt, von Anomalien im Mauerwerk, von etwaigen Rissen und etwaiger Hohlräumigkeit, sowie von dem Versalzungsgrad des Mauerwerks abhängig. Diese altbau-spezifischen Besonderheiten der Injektionsmittel- Anwendung können nicht durch Labor- Reihen- Untersuchungen erfasst werden. Es sind Untersuchungen an Proben, die am Objekt vor Ort gewonnen worden sind, erforderlich. Anhand von den, in dieser Arbeit durchgeführten, Messreihen wurde belegt, dass Injektionsmittel zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung gegen

kapillare Feuchte, keine Breitbandwirkung besitzen. Dieses ist zum einen durch die Unterschiede der Mauerwerks- Materialien begründet. Zum anderen zeigen nicht alle Injektionsmittel die gleiche Wirkung an den unterschiedlichen Materialien, insbesondere in Bezug auf unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade. Aus diesen Gründen muss eine Qualitätsüberwachung des Injektionsmitteleinsatzes während der Anwendung gefordert werden. Zudem ist ein Nachweis des Abdichtungserfolgs nach Durchführung der Injektionsarbeiten (im fertig gestellten Zustand) an Proben aus dem Objekt erforderlich. Durch die baubegleitende Qualitätsüberwachung können Ausführungsmängel in der Frühphase der Arbeiten vermieden/korrigiert werden. Die finale Überprüfung dient der Feststellung des Erreichens des Abdichtungsziels.

11.1.2 **These 2:** Im Nachgang zu der Anwendung von Injektionsmitteln zur nachträglichen Bauwerksabdichtung ist ein Nachweisverfahren zur Dokumentation der Wirksamkeit des Injektionsmittel- Einsatzes und zur Überprüfung, inwieweit die Abdichtungsziele erreicht sind, erforderlich

Vielfach war in der Vergangenheit bezüglich des Injektionsmittel- Einsatzes zu beobachten, dass die Ursachen für das Ausbleiben des Abdichtungserfolgs in der mangelnden Analyse der vorhandenen Gegebenheiten des Abdichtungsobjekts und in der unqualifizierten Wahl des Injektionsmittels lagen. Ebenso waren Unterlassungen bezüglich der Mauerwerksdiagnostik im Vorfeld der Injektionsmittel-Arbeiten festzustellen. Im Ergebnis einer solchen fundierten Vorbereitung sind alle zur Verfügung stehenden Mittel/Maßnahmen zur nachträglichen Abdichtung zu prüfen. In Einzelfällen muss von einem Injektionsmittel- Einsatz sogar abgeraten werden. Auch hier wird der erforderliche differenzierte Umgang mit den Injektionsmitteln deutlich. Bauzustandsanalyse und Mauerwerksdiagnostik, fundierte Konzeptionierung, sowie Qualitätsüberwachungen und der Nachweis der Wirksamkeit der eingesetzten Injektionsmittel müssen zwingend mit ausgeschrieben und vertraglich vereinbart werden. Erst dann werden diese verpflichtend als Leistung vergütet und die Qualität des Injektionsmitteleinsatzes wird steigen. Nach These 1 besteht das Erfordernis die Qualität des Injektionsmitteleinsatzes während der Arbeiten und im Nachgang dazu nachzuweisen. Gemäß dem derzeitigen Stand der Technik können Injektionsmittel nach der WTA zertifiziert werden [66]. Dieses Verfahren wird labormäßig abgearbeitet und von den Herstellern betrieben. Eine solche Zertifizierung bestätigt jedoch lediglich die grundsätzliche Wirksamkeit des Injektionsmittels unter Laborbedingungen. Es bestehen durch diese Zertifizierung jedoch keinerlei Aussagen über die Wechselwirkungen des Injektionsmittels mit dem konkreten örtlichen Mauerwerk. Hier sind vor allen Dingen Unwägbarkeiten, wie Inhomogenitäten, welche öfters in Ziegeln und Mörtel vorkommen, zu nennen. Zudem spielen Risse und die Hohlräumigkeit des Mauerwerks eine Rolle. Da solche Dinge vielfach im Mauerwerksinneren, sprich im Verborgenen liegen, kann selbst eine akribische Mauerwerksdiagnostik nicht alle Unwägbarkeiten im Vorfeld sicher benennen. Weil eine Injektionsmittel- Querschnittsabdichtung häufig nicht die Aufgabe einer Q-Sperre, vergleichbar mit einer Mauersperrbahn hat, ist es erforderlich vor Beginn der Injektionsarbeiten die Abdichtungsziele zu benennen. Diese Ziele sollten in einem Prozentsatz als Verbesserungsmaß ausgedrückt werden. Anhand dieser Ziele können das Injektionsmittel und die Einbring- Technologie gewählt werden. Die in dieser Arbeit geforderte begleitende Überprüfung kann als Korrektiv der bereits begonnenen Arbeiten dienen. Gemäß den baubegleitenden Zwischenergebnissen können vor Ort Anpassungen vorgenommen werden. Auf diese Weise könnte beispielsweise der Bohrlochabstand angepasst werden. Dieses Vorgehen kommt dem Gedanken einer Probeinjektion nahe. Es sollte jedoch dieselbe Analytik gewählt werden, wie in der finalen Überprüfung des Injektionsmitteleinsatzes, da ein solches Vorgehen miteinander vergleichbare Zwischen- und Endergebnisse erzeugt. Bei den derzeit zur Verfügung stehenden Nachweisverfahren werden Langzeit- Feuchtemessungen am Objekt durchgeführt, welche sich über Jahre hinziehen. Zum anderen werden Verfahren angeboten, die mit der Erstellung von quasi genormten Prüfkörpern im Labor einhergehen. Auch diese Verfahren benötigen einen langen zeitlichen Ablauf. Letztendlich ist allen derzeit vorliegenden Nachweisverfahren gleich, dass Injektionsmittel an Prüfkörpern angewendet werden, welche dann im Labor auf Wirksamkeit getestet werden. Mit dem derzeitigen Stand der Technik in Bezug auf Injektionsmittel- Nachweisverfahren können die in dieser Arbeit aufgestellten Forderungen an ein Nachweisverfahren nicht erfüllt werden, siehe 2.3.5.4. Nach Durchführung der Injektionsarbeiten müssen die Abdichtungsziele an Proben des Objektes qualifiziert und differenziert nachgewiesen werden. Es ist daher ein Nachweisverfahren erforderlich, das sowohl während der Arbei-

ten, als auch im Nachgang dazu, schnell, zuverlässig und mit geringem Probenmaterialaufwand die geometrische Ausbreitung des Injektionsmittels und die tatsächlich veränderte Kapillarität im Mauerwerk aufzeigen kann.

11.1.3 These 3: Anhand von rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen im ESEM können Betaungsvorgänge an Baustoffen im mikroskopischen Maßstab in situ erzeugt werden. Diese geben Aufschluss über die Kapillarität des untersuchten Baustoffs.

Im ESEM können die Betaungsvorgänge in situ beobachtet werden. Die Tropfen des Tauwassers reifen in einem dynamischen Prozess heran. Im ESEM können zu jeder Zeit des Heranreifungsprozesses Bilder gemacht werden. Auf diese Weise können an den reifen Tropfen Kontaktwinkelmessungen durchgeführt werden. Die Kontaktwinkelmessung ist ein gut untersuchtes Werkzeug zur Bestimmung des Grades der Hydrophobie. Dieses Verfahren soll nun auf mit Injektionsmitteln behandelte, kapillare Mauerwerke angewendet werden. Zur Messung der Kontaktwinkel im ESEM wurde in dieser Arbeit die Geometrische- Tropfenkontur- Analyse entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird anhand der Untersuchungen in Stufe 2 belegt, dass Betaungsvorgänge im ESEM Aufschluss über die Kapillarität des untersuchten Materials geben können. Das ESEM eignet sich zudem dazu, den Grad der Hydrophilie zu bestimmen. Im Fall, dass es im ESEM auf Grund der Hydrophilie einer untersuchten Probe nicht zur Tropfenbildung kommen kann, kann im ESEM die umgehende Wasserfilmbildung ebenfalls exakt nachgewiesen werden. Bei einer veränderten Kapillarität des untersuchten Stoffes entsteht zum einen, ein zur Referenzprobe abweichender Kontaktwinkel am Tauwassertropfen. Auf diese Weise kann der Grad der Veränderung durch den Injektionsmitteleinsatz gezeigt werden. Zum anderen kann der so gemessene Kontaktwinkel objektiviert werden, indem das Ergebnis nach bestehenden Definitionen für die Hydrophobie eingeordnet wird.

11.1.4 These 4: Anhand von mikroskopischen Analysen im ESEM, kann an kapillaren Baustoffen, die mit Injektionsmitteln behandelt wurden, deren veränderte Kapillarität nachgewiesen werden. Das Nachweisverfahren eignet sich zur baupraktischen Anwendung.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Nachweisverfahren kann sowohl während des Bauprozesses, als auch im Nachgang zu den Arbeiten eingesetzt werden. Es kann mithilfe dieses Verfahrens die durch den Injektionsmittel-Einsatz veränderte Kapillarität des Mauerwerks qualitativ, als auch geometrisch differenziert, nachgewiesen werden. Das hier vorgestellte Nachweisverfahren erfüllt folgende für den baupraktischen Einsatz wichtige Kriterien:

- Es ist die Entnahme von einer Vielzahl von Proben möglich
 - Es müssen keine Prüfkörper erstellt werden; Die Proben sind gut zu transportieren
 - Die Probenentnahme ist in jedem Mauerwerksbereich möglich
 - Die Probenentnahme geschieht minimalinvasiv, mit Mini-Kernbohrungen
 - Die Probenentnahme erfolgt vor Ort, tiefengestaffelt in dem jeweiligen Messfeld
 - Die Probenentnahme erfolgt sowohl während der Arbeiten, als auch im Nachgang dazu
 - Es werden Referenzproben zu Überprüfung der Abdichtungsziele entnommen
 - Die Proben besitzen eine geringe Größe, ein geringes Gewicht
 - Im ESEM können in kurzer Zeit exakte Ergebnisse erzielt werden
- Die ESEM-gestützte Nachweismethode erlaubt exakte und reproduzierbare Messergebnisse
- Die Messergebnisse sind durch vorhergehende makroskopische Messungen objektivierbar
 - Hierzu soll im Vorhinein eine Datenbank, die nach den Injektionsmitteln untergliedert ist, entstehen. Die Daten können bei jedem Messvorgang wiederverwendet werden
- Anhand der im ESEM erzeugten Messergebnisse können sowohl qualitative als auch geometrisch differenzierte Aussagen zur veränderten Kapillarität gemacht werden

12. ZUSAMMENFASSUNG, FAZIT, AUSBLICK

12.1 Zusammenfassung

In der Altbausanierung, insbesondere im Denkmalbereich, werden sehr häufig massive Mauerwerkswände, bestehend aus Ziegelmauerwerken vorgefunden. Da es sich bei Ziegeln um einen kapillaraktiven Baustoff handelt, besteht an den Altbauwänden ein ausgesprochen ausgeprägtes Wasseraufnahme und -abgabe, sowie Wassertransport- Verhalten. In der Historie sind Bauwerksabdichtungen zwar bereits aus dem Altertum bekannt, der regelmäßige Einsatz von funktionierenden Bauwerksabdichtungen begann in Europa jedoch erst um 1890 herum. Dennoch bestanden seinerzeit keine einheitlichen Regeln für die Ausführung von Bauwerksabdichtungen. Erst in den 1930er Jahren wurden Bauwerksabdichtungen in Teilen Europas normativ geregelt. Obwohl die Querschnittsabdichtung in Massivwänden bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert die höhere Priorität vor anderen Abdichtungen an Bauwerken hatte, wurden Querschnittsabdichtungen in Mauerwerkswänden in Europa erst ab etwa 1930 regelmäßig verbaut. Im Altbaubereich werden sehr häufig Gebäude vorgefunden, die einen Keller besitzen, selbst wenn die Raumanforderungen diesen Keller nicht erforderlich machten. Dieses hängt mit der seinerzeitigen Bauweise/Nutzung zusammen, bei der das Kellergeschoss aufgrund fehlender Abdichtungstechnik zwar dauerhaft feucht war, jedoch als ‚Puffer‘ zum Erdgeschoss diente, welches dadurch ausreichend trocken gehalten werden konnte. Auf diese Weise konnte seinerzeit auch ohne Querschnittsabdichtung gebaut werden. Aus diesen Gründen werden in der Altbausanierung und in der Denkmalpflege sehr häufig massive Ziegelwände in Kellern angetroffen, bei denen aufgrund nicht vorhandener Querschnittsabdichtungen aufsteigende Mauerwerksfeuchte herrscht. Auf Grund von Nutzungs- oder Umnutzungs- und Werterhaltungserfordernissen besteht in der Altbausanierung und in der Denkmalpflege nun jedoch sehr häufig die Notwendigkeit kapillare Mauerwerkswände dauerhaft gegen aufsteigende Feuchte, nachträglich im Wandquerschnitt abzudichten.

Zur Nachrüstung von Mauerwerks-Querschnittsabdichtungen bestehen drei Hauptgruppen. Zum einen können mittels Mauersägeverfahren nachträglich mechanische Querschnittsabdichtungen eingebaut werden. Zum anderen kann im Rahmen eines Mauerersatzverfahrens die fehlende Abdichtungsbahn ergänzt werden. Diese beiden Verfahren bedeuten jedoch jeweils mechanische und somit statische Eingriffe in die Altsubstanz. Daher wird die größte Gruppe der nachträglichen Querschnittsabdichtungen von den hier betrachteten Injektionsmittel- Verfahren dargestellt, bei denen keine statischen Eingriffe erforderlich sind. Derzeit stehen in Europa etwa 150 verschiedene Injektionsmittel zur nachträglich Querschnittsabdichtung an kapillaren Mauerwerken zur Verfügung. Allen Injektionsmitteln ist gemein, dass sie mittels der Herstellung von Bohrlochketten in das Mauerwerk appliziert werden. Die Injektionsmittel reagieren chemisch, bilden jedoch nach dem Ausreagieren auf physikalische Weise eine Abdichtende Ebene im Mauerwerk. Es bestehen drucklose Verfahren, deren Applikation durch Kapillarität oder durch Schwerkraft erfolgt. Zudem bestehen Druckverfahren, bei denen das Injektionsmittel unter Nieder- oder Mitteldruck in das Mauerwerk gepresst wird. Auf Grund der, den seinerzeit verwendeten Ziegeln eigenen Inhomogenitäten, die beispielsweise aus Unterschieden im Brand herrühren können, werden häufig an Altbauziegelwänden erschwerte Bedingungen angetroffen. Hinzu kommen etwaige seinerzeitige Verarbeitungsfehler der Mörtelfugen, Kriegsschäden, Risse und etwaige Hohlräumigkeiten des zu behandelnden Mauerwerks. Zwar soll der Zustand des zu behandelnden Altbaumauerwerks in der Mauerwerksdiagnostik vor dem Injektionsmitteleinsatz erfasst werden, dennoch bleiben Unwägbarkeiten bestehen, da die Mängel am Mauerwerk in der Regel verdeckt, nicht einsichtig sind und daher unbemerkt bleiben können.

Die grundsätzliche Wirkungsweise eines Injektionsmittels kann in Europa über eine WTA- Zertifizierung nachgewiesen werden. Dieser Nachweis bezieht sich jedoch auf ein Norm- Mauerwerk mit Norm- Mörtel und wird im Labor an Prüfkörpern im Langzeitverfahren erbracht. Auch andere bekannte Nachweisverfahren basieren auf Laboruntersuchungen an Prüfkörpern und örtlichen Langzeitmessungen des Trocknungsverhaltens nach der Applikation von Injektionsmitteln. Es besteht daher insoweit derzeit keine Nachweisverfahren, bei dem Aussagen zur Wirksamkeit des Injektionsmittels, in kurzer Zeit an vor Ort entnommenen Proben mit geringen Probenmengen, getätigt werden können. Daher besteht der Bedarf an einem geeigneten neuen Nachweisverfahren.

Der Injektionsmitteleinsatz mittels Bohrlochketten hat zum Ziel die Kapillarität des Altbaumauerwerks derart zu verändern, so dass gemäß den vorher formulierten Abdichtungszielen, die kapillare Weiterleitung von Wasser im Mauerwerk gebremst oder gar gestoppt wird. Um das Injektionsverfahren überwachen und die Wirksamkeit des Injektionsmittels nachweisen zu können, gilt es daher die am Objekt tatsächlich veränderte Kapillarität in ihrer Qualität und Quantität zu erfassen. Zudem muss die geometrische Ausbreitung des applizierten Injektionsmittels im Mauerwerk überprüft werden, da diese in direktem Zusammenhang mit der Wirksamkeit des Injektionsmittels steht. Da alle bestehenden Nachweisverfahren ein Langzeit- Prozedere besitzen und/oder an Labor- Prüfkörpern erfolgen, sind diese Prüfverfahren aus baupraktischen Erwägungen für die hier definierten Zwecke nicht einsetzbar.

Ein Nachweisverfahren zur Überprüfung des eingesetzten Injektionsmittels am konkreten Objekt muss sowohl die Fragen nach der geometrischen Ausbreitung des Injektionsmittels, als auch die nach der Wirksamkeit des Mittels innerhalb der Ausbreitzzone / Injektionsebene, beantworten können.

Die Anforderungen an die Prüfmatrix dieses Nachweisverfahrens müssen folgenden Parametern folgen:

- Die Entnahme von einer Vielzahl von Proben muss möglich sein:
 - Probenentnahme vor Ort an jedwedem Mauerwerksbereich
 - Probenentnahme während der Arbeiten und nach Abschluss der Injektions- Arbeiten
 - Probenauswahl und Probenentnahme aus der Injektionsebene
 - Referenzproben an anderen Mauerwerksbereichen zur Verifikation
 - Geringes Gewicht der einzelnen Proben
 - Geringe Größe der einzelnen Proben
 - Einfache minimalinvasive Probenentnahme
 - Probenentnahme in Messachsen in unterschiedlichen Tiefen des Mauerwerks
- Zur genauen Bestimmung ist eine laborgestützte Nachweismethode erforderlich
- Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse muss gegeben sein
- Die Messergebnisse müssen objektivierbar sein
- Die Messergebnisse müssen differenzierte Aussagen zur Wirksamkeit des Injektionsmittels ermöglichen
- Die Ergebnisse müssen sowohl qualitative, als auch quantitative Aussagen zur Wirksamkeit erlauben
- Die Ergebnisse müssen in kurzen Zeitabschnitten vorliegen

In dieser Arbeit wird ein neues Nachweisverfahren für den qualitativen und quantitativen Nachweis von, durch Injektionsmittelanwendung in ihrer Kapillarität veränderten Baustoffen, vorgestellt. Dieses Verfahren erfüllt die oben ausgeführten Anforderungen. Die Intention des hier vorgestellten Nachweisverfahrens ist es, auf die bestehenden Verfahren aufzusetzen und diese weiterzuentwickeln. Das in dieser Arbeit vorgestellte Nachweisverfahren basiert auf der Kontaktwinkelbestimmung im ESEM in Korrelation mit über ein rechnerisches Modell ermittelten w -Werten. Bei dem ESEM handelt es sich um eine modifizierte Version eines REM. Im Gegensatz zum REM kann im ESEM im Low Vacuum Mode gearbeitet werden. Dieser Umstand erlaubt das Zuführen eines Mediums (hier Wasser) während der Untersuchung. Mithilfe eines Kühltesches in der Kammer kann die Probe im ESEM gekühlt werden, während sich in der Kammer ein Klima mit 100% Relative Luftfeuchte befindet. Durch Veränderung des Kammerdrucks kann im ESEM eine Betauung provoziert werden. An den auf der Probe entstehenden Wassertropfen können die Kontaktwinkel bestimmt werden. Bei der Kontaktwinkelmessung macht man sich die Grenzflächenspannung des Wassers zunutze. Im ESEM können sowohl statische, als auch dynamische Kontaktwinkel gemessen werden. Die Kontaktwinkel geben Aufschluss über die Kapillarität des Probenmaterials, auf dem die Tropfen entstanden sind. In dieser Arbeit wurde zur Kontaktwinkelmessung im ESEM die ‚Geometrische- Tropfen- Kontur- Analyse‘ entwickelt, bei der die im Raum liegenden Tropfen mithilfe eines geometrischen Modells gemessen werden können.

Das hier vorgestellte Nachweisverfahren wurde anhand eines 2 – stufigen Versuchs an, mit Injektionsmitteln behandelten Mörtel- und Ziegelproben belegt. In der ersten Stufe wurden an den Proben zur Datenermittlung konventionelle, makroskopische Messverfahren durchgeführt. In der zweiten Stufe wurden an einer Auswahl von Proben, neben der Messung von RH- Werten (Stufe 1a), die in versiegelten Messkammern inmitten der Proben gemessen worden sind, mithilfe des ESEM mikroskopische Kontaktwinkelmessungen durchgeführt. Anhand einer rechnerischen Modellierung konnten die in der ersten Stufe gewonnenen Daten mit den im ESEM gemessenen Kontaktwinkeln korreliert werden. Auf diese Weise lassen sich den ESEM- Messwerten makroskopische Werte der ersten Stufe, wie w -Wert und fiktive Wassergehalte, zuordnen. Im Ergebnis erhält man, neben den ESEM-Kontaktwinkeln, rechnerisch ermittelte w -Werte und fiktive Wassergehalte für die jeweilige Probe, welche Aufschluss über

die veränderte Kapillarität im Vergleich zur Referenzprobe geben. Die w-Werte können nach der bestehenden Bewertungsmatrix aus Abbildung 35 nach DIN EN ISO 15148 ausgewertet werden. Die fiktiven Wassergehalte und die RH- Werte können in einer Feuchtesimulation verarbeitet werden.

Im Anwendungsfall werden an zuvor definierten Messfeldern, die in Messachsen, tiefengestaffelt entnommenen Proben im ESEM auf ihre Kontaktwinkel hin untersucht. Aus den daraus gewonnenen Daten ergibt sich in Korrelation mit den Daten der Stufe 1 ein geometrisch differenziertes Bild der veränderten Kapillarität des Mauerwerks. Das Nachweisverfahren kann zum einen Aufschluss über die Qualität des Injektionsmitteleinsatzes und zum anderen auf Grund der geometrischen Zuordnung auch Aufschluss über die Quantität der Injektionsmittelanwendung geben.

In Abbildung 77 ist zur Verdeutlichung der Ablauf des Prüfverfahrens in einer Matrix erläutert.

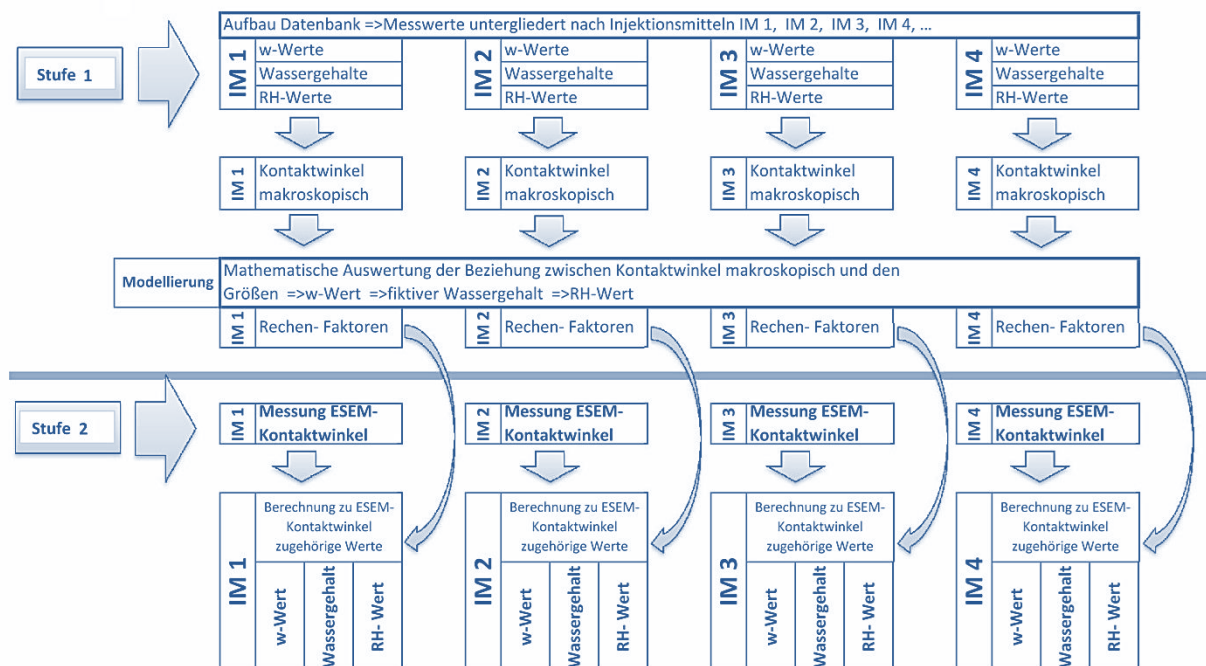


Abbildung 77: Matrix zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Nachweisverfahren, Quelle: Körber P. [Anlage 19]

12.2 Fazit

Das hier beschriebene neue laborgestützte Verfahren zum Nachweis der Wirksamkeit von applizierten Injektionsmitteln, die für nachträglichen Mauerwerksabdichtungen gegen kapillar aufsteigende Mauerwerksfeuchte eingesetzt werden, kann die veränderte Kapillarität des Mauerwerks mittels bildgebender Verfahren in situ nachweisen. Der Nachweis erfolgt im ESEM-Modus des REM mittels Betauung von Proben, die in der Injektionsebene und an Referenzstellen des Mauerwerks gewonnen werden. Die Kapillarität der Baustoffe wird mittels Kontaktwinkelmessung an den im ESEM erzeugten Tauwassertropfen nachgewiesen. Im Rahmen der vorliegenden Versuchsreihe wurden insgesamt 122 Ziegel- und Mörtelproben verschiedener Rohdichten und unterschiedlicher Durchfeuchtungsgrade mit drei verschiedenen hydrophobierenden und kapillar verengenden Injektionsmitteln behandelt. An allen Proben wurden die makroskopischen Kontaktwinkel, w-Werte und die fiktive Wasseraufnahme gemessen. Es wurde ein rechnerisches Modell verwendet, um jedem im ESEM gemessenen mikroskopischen Kontaktwinkel einen makroskopisch ermittelten w-Wert und eine fiktive Wassermenge zuzuordnen zu können. Mit diesen Werten kann mittels des w-Wertes die Kapillarität der jeweiligen Probe gemäß der Prüfmatrix in Abbildung 35 bewertet werden. Dieses w-Wert- Bewertungsverfahren ist in Europa genormt: DIN EN 1062, DIN EN 15148. Die fiktiven Wassergehalte die RH- Werte sind die Grundlage für eine (fiktive) Feuchtesimulation.

Das hier vorgestellte neue Nachweisverfahren für die Wirksamkeit von Injektionsmitteln besitzt einen baupraktischen Nutzen. Es wird als Weiterentwicklung bestehender Verfahren verstanden. Anders als

bei bestehenden Nachweisverfahren können bei dem hier vorgestellten Verfahren, die minimalinvasiv, mit Hilfe von Mini-Kernbohrungen örtlich gewonnenen Proben auf Grund der geringen Probengröße kurzfristig im Labor untersucht werden. Im Ergebnis kann anhand des hier beschriebenen Nachweisverfahrens während der Injektionsarbeiten ein qualitatives, geometrisch differenziertes Bild von der Wirksamkeit des Injektionsmittels wiedergegeben werden. Auf diese Weise wird die tatsächliche Ausbreitung des Injektionsmittels im Mauerwerk geometrisch belegt. Im Anschluss an die Injektionsarbeiten, kann der Abdichtungserfolg in gleicher Weise belegt werden. Die Genauigkeit des hier beschriebenen Nachweisverfahrens ist in Bezug auf die im ESEM gemessenen Kontaktwinkel mit $\pm 3^\circ$ anzunehmen. Eine solche Genauigkeit ist für den hier beschriebenen Einsatz als Nachweisverfahren der Wirksamkeit von Injektionsmitteln als ausreichend anzusehen.

12.3 Ausblick

Zur Korrelation der im ESEM gemessenen Kontaktwinkel ist zukünftig der Aufbau einer, nach Injektionsmitteln untergliederten, Datenbank mit makroskopisch ermittelten Daten, wie w-Werte, fiktive Wasseraufnahmen und RH- Werten, vonnöten. Für die Datenbank ist die Verwendung eines Norm- Mauerwerks anzuraten. Die einzelnen Injektionsmittel und Durchfeuchtungsgrade, sowie Einbringmethoden sind jedoch zu differenzieren. In der Folge können den im ESEM gemessenen Kontaktwinkeln w-Werte und fiktive Wassergehalte gemäß den Differenzierungen nach den einzelnen Injektionsmitteln zugeordnet werden. Die in der Datenbank vorhandenen Werte können für jede artgleiche ESEM- Messung wiederverwendet werden. Mit den Ergebnissen der rechnerischen Modellierung können zukünftig rechnergestützte Feuchtesimulationen zu der fiktiven Durchfeuchtungssituation im gewählten Messfeld erstellt werden. Mithilfe der Datenbank können die ESEM- Kontaktwinkelmessungen für einschlägige (marktgängige) Injektionsmittel vorbereitet werden und die Auswertung kann im Anwendungsfall zügig zu Ergebnissen führen.

In der Weiterentwicklung des hier vorgestellten Nachweisverfahrens sollten zukünftig neben den labormäßigen Betaungen im ESEM, örtliche Tropfentests mit Handgeräten gemäß Abbildung 78 hinzugezogen werden. Auf diese Weise können zusätzlich vor Ort Schnelltests durchgeführt werden, deren Ergebnisse unter Verwendung rechnergestützter Kontaktwinkelmessungen sehr früh und sehr schnell Abschätzungen zum Abdichtungserfolg zulassen. Anhand solcher Abschätzungen kann kurzfristig auf sich abzeichnende Fehlergebnisse durch Korrekturen des Injektionsvorgangs reagiert werden. Geeignete Geräte stehen in Form des Mobile Surface Analyzer bereits zur Verfügung, Abbildung 78. [154]

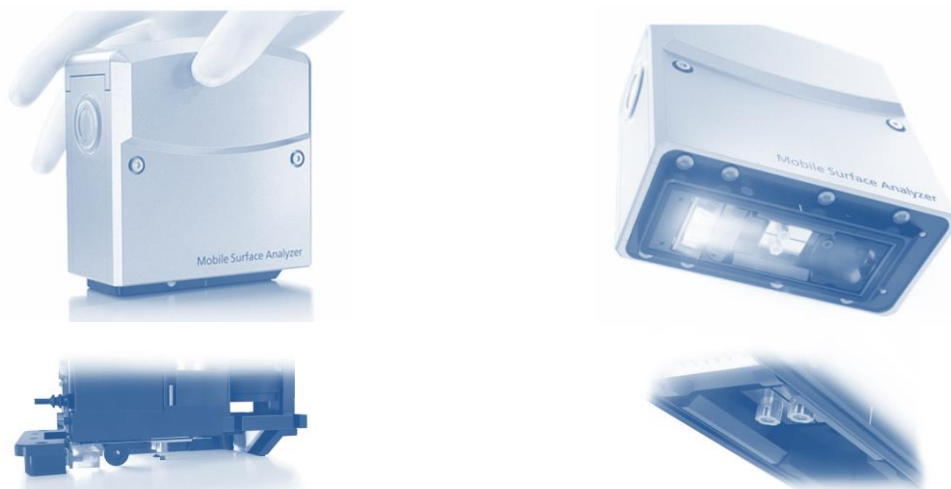


Abbildung 78: Örtlicher Einsatz von Kontaktwinkelmessung mit dem Mobile Surface Analyzer, Quelle: Krüss [154]

In der Weiterentwicklung des hier vorgestellten Nachweisverfahrens kann zukünftig die Analyse der im ESEM festgestellten Kontaktwinkel mittels eines rechnergestützten Tools durchgeführt werden. Hier bestehen Softwarelösungen, bei denen die 3D- Bildauswertung zu einer höheren Genauigkeit des zu messenden Kontaktwinkels führt. Es kann diesbezüglich davon ausgegangen werden, dass sich auf diese Weise die Genauigkeit der Kontaktwinkelmessung auf $\pm 1^\circ$ steigern ließe. [133]

1. NACHSPANN

I. Veröffentlichungen von P. Körber im Rahmen dieser Thesis

In Zusammenhang mit dieser PHD- Thesis wurden von Peter Körber die nachfolgend aufgeführten wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht:

| OZ | Titel der Veröffentlichung | Autor | Co- Autor | Jahr | Verlag |
|----|---|------------|--------------|------|--|
| A | Injektionsmittel für die nachträgliche Horizontabdichtung gegen kapillaren Feuchttransport Für jeden Fall das passende Mittel B + B, Bauen im Bestand | Körber, P. | Rupieper, D. | 2013 | Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln |
| B | Rasterelektronenmikroskopische Nachweise von Injektionsmitteln in Mörtel- und Ziegelstrukturen unter Nutzung von Betaungsvorgängen Energilieferant Altbau Potentiale, Nachhaltigkeit, Objektbeispiele | Körber P. | Venzmer H. | 2017 | Beuth Verlag Berlin |
| C | Feuchteschutz in der Altbausanierung Fehlende nachträgliche Bauwerksabdichtung im Mauerwerk provoziert Folgeschäden Der Bauschaden Spezial | Körber P. | | 2017 | Forum Verlag Herkert GmbH Merching |
| D | Mortar and brick materials treated with hydrophobic injection media, studied by Environmental Scanning Electron Microscopy | Körber P. | | 2018 | Pollack Periodica Vol. 13 |
| E | Zweistufiges Untersuchungsprogramm zum Nachweis der Wirksamkeit von Injektionsmitteln in Mauerwerksstrukturen | Körber P. | Venzmer H. | 2018 | Edition Bautenschutz |

II. Referenzen

- [1] Bonk, M. / Cziesielski, E., Lufsky, Bauwerksabdichtung, Bd. 7. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2010, p. XVII 609.
- [2] Klauß, S. / Kirchhof, W., Altbaukonstruktionen- Materialien und U-Werte im Gebäudebestand: Baustoffe und Bauweisen mit regionalem Bezug, Fraunhofer IRB Verlag, 2010, p. 192.
- [3] Buss, H., Der Sachverständige für Schäden an Gebäuden. Handbuch für Ausbildung und Praxis, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002, p. 331.
- [4] Deutscher Holz- und Bautenschutzverband e.V. DHBV, Handbuch der Bauwerksabdichtung: Normen, Regeln, Technik, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 2009, p. 300.
- [5] Franke, L. / Schumann, I., Schadensatlas, Klassifikation und Analyse von Schäden an Ziegelmauerwerk, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998, p. 172.
- [6] Frössel, F., Lehrbuch der Kellerabdichtung und -sanierung, Expert Verlag, Renningen, 2009, pp. 73-100.
- [7] Frössel, F., Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung. Wenn das Haus nasse Füße hat, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012, pp. 263-321.
- [8] Seele, J., Wasser- und Salztransport in Bauteilen - Schadensmechanismen und ihre Auswirkungen in Bauteilen, in *Feuchteschäden und Trockenlegung von historischen Bauten*, Bd. 12, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, pp. 53-63.

- [9] Moschig G., Bausanierung, Grundlagen-Planung-Durchführung, 3.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2010
- [10] Stahr, M. u.a., Bausanierung, Erkennen und Beheben von Bauschäden, 6. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, 2015, p. 991.
- [11] Moschig, G.F., Bausanierung, Grundlagen-Planung-Durchführung, Bd. 4. Auflage 2014, Springer Vieweg, Heidelberg, 2014, p. 459.
- [12] Stahr, M. (Hrsg), Bausanierung, Erkennen und Beheben von Bauschäden, 4. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg, 2009
- [13] Scholz, W. / Hiese, W. / Möhring, R. u.a., Baustoffkenntnis, Bd. Auflage: 18, Bundesanzeiger Verlag, Köln, 2016, p. 1058.
- [14] Hauser, G., *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre*, Universität Kassel, Fakultät Bauphysik (Hrsg.), Kassel, 2003, Manuskript.
- [15] Deutsches Institut für Normung, „DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [16] Thienel, K.-Ch., *Werkstoffe I, Allgemeine Grundlagen- Stoffkennwerte*, Universität der Bundeswehr München, Institut Bauwesen (Hrsg.), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2011, München, Manuskript.
- [17] Gann, *Bedienungsanleitung Hydromette*, Gann Mess- und Regeltechnik GmbH, Stuttgart, 2003.
- [18] Künzel H.M. / Krus M., „Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen,“ *IBP Mitteilungen 274*, Fraunhofer Institut Bauphysik, Stuttgart, 1995.
- [19] Hölzen, F.-J. / Weber, H., Abdichtungen von Gebäuden: Leitfaden für Neubau und Bestand, Auflage 2., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014, p. 260.
- [20] Weber J., Horizontalsperren im Injektionsverfahren, in Weber J., Hafkesbrink V. (Eds.) *Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung: Verfahren und juristische Betrachtungsweise*, Springer Vieweg, Wiesbaden 2012, pp. 205- 235.
- [21] Arendt, C. / Seele, J., Feuchte und Salze in Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden, 2001, pp. 12-16
- [22] Weber, H., Wasseraufnahme von Baustoffen, KBB Prof. Weber (Hrsg.), KBB GmbH, München, 2008
- [23] Hölzen, F.-J. / Weber, H., Abdichtung von Gebäuden, Leitfaden für Neubau und Bestand, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010, pp. 25-63, 146-167.
- [24] Althaus N., Ziegel Verblendmauerwerk, *Planung und Ausführung, Zweischalige Wand Marketing e.V. (Hrsg), Bonn*, 2008, Broschüre.
- [25] Ziegel Fibel, *Fakten über Ziegel, Ziegelsteine*, Mein Ziegelhaus GmbH & CoKG, Alzenau, 2007.
- [26] Schubert, P., *Kalksandstein - Mauermörtel und Putz*, Aachen, 2014, Broschüre.
- [27] Sakret, *SAKRET Vormauermörtel VK*, 2017 Technisches Materialdatenblatt.
- [28] Deutsches Institut für Normung, „VOB Teil C DIN 18330 Maurerarbeiten“, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [29] Gaubner, C.-A., Mauerwerksbau aktuell: Praxishandbuch 2016 für Architekten und Bauingenieure, Bd. Auflage: 1, Bauwerk / Beuth Verlag, Berlin, 2015, p. 480.
- [30] Schmidt, J. / Kornadt, O., „Konvektiver Feuchtetransport durch die Gebäudehülle - neuartiges Messsystem zur Klärung relevanter Fragen,“ pp. 29-33, 4/2012 *Der Bausachverständige*.
- [31] Fischer/Jenisch/Stohrer/Homann/Freytmuth/Richter/Häupl, Lehrbuch der Bauphysik, Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima, 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2007.
- [32] Wallasch, S., Pathologie der Ziegelmauerwerke und keramischen Baustoffen, in *Feuchteschäden und Trockenlegung von historischen Bauten*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, pp. 65-74.
- [33] Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland, Feuchteschäden und Trockenlegung von historischen Bauten, Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Erstausgabe, 1. Auflage, Fraunhofer IRB, Verlag, Stuttgart, 2004, p. 79.
- [34] IFB Bauforschung, Institut für Bauforschung e.V., „Forschungsbericht: IFB-19568/2009; Untersuchung; Feuchteschäden durch fehlerhafte Bauwerksabdichtungen,“ Institut für Bauforschung e.V., Hannover, 2009, Forschungsbericht.
- [35] Remmers, Produktunterlagen, *Trocken und Dicht mit System, Nachträgliche Bauwerksabdichtung / Mauerwerkssanierung*, 2016.
- [36] Török B. / Len A. / Orban Z., Salt content analysis of historic masonries with SEM, *Pollack Periodica*, Vol. 12, No. 3, 2017, pp. 99 -108.
- [37] Rucker-Gramm, P., *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen*, Auflage 1, DAfStb (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [38] Ansorge, D., Bauwerksabdichtung gegen von außen und innen angreifende Feuchte, Band 1, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011, p. 297.
- [39] Hestermann, U. / Rongen, L., Frick / Knöll Baukonstruktionslehre Teil 1, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2015, p 929.
- [40] Hestermann, U. / Rongen, L., Frick / Knöll Baukonstruktionslehre Teil 2, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2013, p 801.
- [41] Schmitt, H. / Heene, A., Hochbaukonstruktion, Die Bauteile und das Baugefüge Grundlagen des heutigen Bauens, Bd. 15, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2001, p. 750.
- [42] Appel, B. / Bertels, M. / Dahmen, P. / Engel, J. / Fischinger, R. / Fix, W. / Gänsmantel J. / Georgy, I. / u.a., Praxis-Handbuch Bautenschutz: Beurteilen, Vorbereiten, Ausführen, Rudolph Müller Verlag, Köln, 2012, p. 210.
- [43] Deutsches Institut für Normung, „DIN 18533-3 Abdichtungen für erdberührte Bauteile“, Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [44] Belz, W./ Gösele K. / Jenisch, R. / Pohl, R. / Reichert, H., Mauerwerk Atlas, 5. Auflage, Rudolf Müller Verlag, Köln, 1996, p. 316.
- [45] Pfeifer, G./ Ramcke, R./ Achtziger, J./ Zilch K., Mauerwerk Atlas, 6.Auflage, Birkhäuser Verlag, München, 2001, p. 392.

- [46] Sack W.-M., BWA-Richtlinien für Bauwerksabdichtungen, Bd.1, Beuth Verlag, Berlin, 2016, p. 422.
- [47] Herres M. / Göker G., BWA - Richtlinien für Bauwerksabdichtungen, Bd. 3, Otto Elsner Verlag, Dieburg, 2009, p. 160.
- [48] Ehbrecht H., BWA - Richtlinien für Bauwerksabdichtungen, Bd. 2, Otto Elsner Verlag, Dieburg, 2006, p. 92.
- [49] Braun E., BWA - Richtlinien für Bauwerksabdichtungen, Bd.1, Otto Elsner Verlag, Dieburg, 2004, p. 75.
- [50] Deutsches Institut für Normung, „DIN 18195 Bauwerksabdichtungen“, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [51] Deutsches Institut für Normung, „VOB Teil C DIN ATV 18336 Abdichtungsarbeiten“ Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [52] Deutsches Institut für Normung, „DIN 18130“, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [53] Deutsches Institut für Normung, „DIN 18130, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben- Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts“, Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [54] Patitz G., „Anwendung zerstörungsfreier Verfahren zur Untersuchung alten Mauerwerks und alter Betonbauwerke,“ *Der Bausachverständige*, pp. 9-14, 3/2009, Der Bausachverständige.
- [55] Balak M./ Pech A., Mauerwerkstrochenlegung, Birkhäuser Verlag, Basel, 2017, p. 273
- [56] Venzmer, H., Mauerwerkssanierung von A-Z; Fachbeiträge zu Diagnostik und Instandsetzung, Bauwesen Verlag, Berlin, 2001, p. 560.
- [57] Frössel F., „Wunsch und Wirklichkeit bei der nachträglichen Horizontalabdichtung,“ in *Feuchteschäden und Trockenlegung von historischen Bauten*, Bd. 12, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, pp. 15-32.
- [58] Hölzen F.-J., „Praxisbeispiel einer ganzheitlichen nachträglichen Bauwerksabdichtung mit Systemgarantie,“ *Bausubstanz*, 1/2016 pp.44- 47
- [59] Honsinger D.J., „Abdichtung von erdberührten Bauteilen,“ *Der Bausachverständige*, 4/2015, pp. 9-15
- [60] Künzel H., Bauphysik und Denkmalpflege, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009, p. 148.
- [61] Künzel H., „Bauphysik- Geschichte(n) Nr. 17, Aufsteigende Feuchte: Großes Fragezeichen!“, *ARCONIS 4/2002*, pp. 24-26
- [62] Körber P. / Rupieper D., „Marktübersicht Injektionsmittel für die nachträgliche Horizontalabdichtung gegen kapillaren Feuchtetransport,“ *B+B Bauen im Bestand*, 5. Ausgabe, 2013, pp. 54 - 60.
- [63] Körber, P., „Unterlassene Injektionsmittelabdichtung hat Folgeschäden, Hausschwamm durch fehlende nachträgliche Abdichtungen“, in *Der Bauschaden Spezial, Feuchteschutz in der Altbausanierung*, Forum Verlag, Merching, 2017.
- [64] Butt, H.-J. / Auernhammer, G.K. / Vollmer, D., *Oberflächen mit Phobie*, in *Physik Journal 14 Nr.2, Wiley-VHC Verlag, Weinheim*, 2015, pp.25-30
- [65] Honsinger D.J., „Nachträgliche Abdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchte in Mauerwerk,“ *Der Bausachverständige*, 1/2013, pp. 23-32
- [66] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-10-15/D*, 02/2015.
- [67] Venzmer H. (Hrsg), *Bautenschutz-Innovationen*, Beuth-Verlag, Berlin, 2013, p.228
- [68] BuFAS-Bundesverband Feuchte & Altbausanierung e.V., *Ingenieur-Merkblatt IM-01/2009/T1-6*, H. Venzmer, Hrsg., 2009, p. 32.
- [69] Akademie Bernhard Remmers, „Gebäudeinstandsetzung 10“, Ausgabe 2010, pp. 27-41 und 100-119
- [70] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 12“, Ausgabe 2012, pp. 172-191
- [71] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 13“, Ausgabe 2013.
- [72] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 14“, Ausgabe 2014, pp. 70-73.
- [73] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 15“, Ausgabe 2015.
- [74] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 17“, Ausgabe 2017, pp. 32-35.
- [75] DESOI, *Horizontalabdichtung, Nachträgliche Injektionen gegen kapillar aufsteigende Feuchte*, DESOI GmbH, Kalbach, 2017.
- [76] Engels, M. / Hofmann, K. / Zemke, J.-P. / Büchner, R., *Injektions-ABC: Das Nachschlagewerk für den Bauspezialisten*, Auflage 2., überarbeitete Aufl., DESOI GmbH, Kalbach, 2013, p. 168.
- [77] Venzmer, H. (Hrsg), „Messen und Sanieren“, 17. Hanseatische Sanierungstage Kühlungsborn, BuFAS Schriftenreihe, 2006.
- [78] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 3-17*, Fraunhofer IRB Verlag, 2010, p. 18.
- [79] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-11-02/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 2014, p. 20.
- [80] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-3-98/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 1998, p. 14.
- [81] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-4-04/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 2004, p. 21.
- [82] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-5-99/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 1999, p. 16.
- [83] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-6-05/D*,

- Fraunhofer IRB Verlag, 2005, p. 24.
- [84] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-6-14/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [85] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt 4-7-02/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 2002, p. 8.
- [86] WTA Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., *Merkblatt E 4-6-12/D*, Fraunhofer IRB Verlag, 2012, p. 32.
- [87] Lesnych, N. u.a. / Venzmer, H., „Dicht oder undicht? Tomografische Analytik von Injektionsmittel-Horizontal-abdichtungen an verschiedenen Objekten,“ in *Abdichten im Holz- und Bautenschutz: Normen, Regeln und Entwicklung*, Beuth-Verlag, Hrsg., B+B Forum Wismar, 2011, pp. 29-53.
- [88] Venzmer, H. / Schmidt, B. / Schmidt, D., (Hrsg), *Energielieferant Altbau, Potenziale/Nachhaltigkeit/Objektbeispiele*, Beuth Verlag, Berlin, 2017, p. 217.
- [89] Walter A. / Venzmer H., *Nachweis von Injektionsmitteln in mineralischen Baustoffen mittels Thermischer Analyse (TA)*, in Schmidt B., Schmidt D., Venzmer H., (Hrsg) *Energielieferant Altbau, Potenziale/Nachhaltigkeit/Objektbeispiele*, Beuth Verlag, Berlin, 2017, pp. 77-84
- [90] Venzmer H./ Walter A., *Bautenschutz durch Abdichtung: Modellierung der Injektionsmittel-ausbreitung in mauerwerksbaustoffen*, in Venzmer H. (Ed.) *Bautenschutz: Innovative Sanierungslösungen*, Auflage 1, Beuth Verlag, Berlin, 2014, pp. 21–29.
- [91] *Frankfurter Bausachverständigentag, Bauwerksabdichtung - Planung, Qualitätssicherung und Sanierung: 52. Frankfurter Bausachverständigentag am 29. September 2017, Bd. 52 Frankfurter Bausachverständigentag / Tagungsband*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2017, p. 84.
- [92] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 16“, Ausgabe 2016.
- [93] Weber, H., „Keine Planung ohne Bauzustandsanalyse,“ *Der Bausachverständige*, 2/2005, pp. 19-23.
- [94] DESOI, *Produktsortiment für mineralische Anwendungen*, DESOI GMBH, Kalbach, 2014, Prospekt.
- [95] Hardt T. A., *Environmental SEM and Related Applications*, In: Rickerby D. G., Valdrè G., Valdrè U. (Eds.) *Impact of Electron and Scanning Probe Microscopy on Materials Research*, NATO Science Series (Series E: Applied Sciences) Vol. 364, Springer Netherlands, 1999, pp. 397-406.
- [96] Stelmashenko N. A. / Craven J. P./ Donald A. M./ Terentjev E. M. / Thiel B. L., *Topographic contrast of partially wetting water droplets in environmental scanning electron microscopy*, *Journal of Microscopy*, Vol. 204, No. 2, 2001, pp. 172–183.
- [97] Danilatos, G.D., „Environmental Scanning Electron Microscopy,“ in *In-Situ Microscopy in Materials Research*, ESEM Research Lyboratory, Sydney, Australia, Springer Science+Business Media New York, 1997, pp. 13-44.
- [98] Stokes D.J. / Thiel B.L. / Donald A.M., „Dynamic secondary electron contrast effects in liquid systems studied by ESEM,“ *Polymers and Colloids, Department of Physics, University of Cambridge, UK*, 2000.
- [99] Rykaczewski K. / Scott J. H. J. / Fedorocv G., *Electron beam heating effects during environmental scanning electron microscopy imaging of water condensation on superhydrophobic surfaces*, *Applied Physics Letters*, Vol. 98, 2011, pp. 106- 109.
- [100] Doehne E./ Stuli C., *Applications of the environmental scanning electron microscope to conservation science*, *MRS Online Proceeding Library Archive, Symposium G - Materials Issues in Art and Archaeology II*, Vol. 185, 1990, pp. 23–29
- [101] Doehne E., *ESEM development and application in cultural heritage conservation*, *In-Situ Microscopy in Materials Research*, P. I. Gai (Ed.) Ch. 3, 1997, pp. 45 -62.
- [102] Milijkovic N. / Enright R. / Wang E., *Modeling and optimization of superhydrophobic condensatation*, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 135, No. 11, 2013, paper No. HT-12-1145.
- [103] Yuan A. / Lee T. R., *Contact angle and wetting properties*, in Bracco G., Holst B. (Eds.), *Surface Science Techniques*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 3- 34.
- [104] Hacquebord A./ Lubelli B./ Hees van R./ Nijland T., *Evaluation of spreading and effectiveness of injection products against rising damp in mortar/brick combinations*, *Procedia Chemistry*, Vol. 8, 2013, pp. 139–149
- [105] Tamas F./ Tuns I., *Removing capillary moisture from brick walls using a drying method and case study*, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences*, Vol. 3, No. 52, 2010, pp. 323–328.
- [106] Pop, M. / Campian C., *Methods for elimination of dampness in Building walls*, *IOP Conference Series: Material Science and Engineering 133*, 2016
- [107] Nenadálova S./ Balik L./ Kolisko J. / Klecka T., *Impact of the chemical injection method on the dispersion of the injected agents in masonry*, *Proceedings of the Conference on the Rahabilitation and Reconstruction of Buildings, CRRB 2012, Advanced Materials Research*, Vol. 688, 2012, pp. 73–78
- [108] Hecht, C. / Steiner, T., „Die Kontaktwinkelmessung für den Bausachverständigen,“ *Der Bausachverständige*, 2/2009, pp. 29-31
- [109] Herrmann, U./ Littmann, K. / Mengel, U., *Hydrophobierungen - Über die Kunst, Wasser von mineralischen Baustoffen fernzuhalten*, *Universität Hannover 3/4*, 2002, 68-71.
- [110] Unterderweide, K. / Schmidt -Döhl, F., „Moderne Pysikalische Methoden bei Bauschadensuntersuchungen,“ *Der Bausachverständige*, 4/2009, pp. 12-16

- [111] Weber, H., Entfeuchtung und Trockenlegung von Mauerwerk - Teil II, Mauerwerk/Salze/Trockenlegung/Risse, Arconis, 1/2002.
- [112] Weber, H., „Imprägniermittel und Imprägniercremes,“ *Der Bausachverständige*, 6/2005, pp. 26-30
- [113] Remmers Baustofftechnik GmbH, „Bauwerkserhaltung / Baudenkmalpflege 2003“, 2003, pp. 177-184, 215-231
- [114] Remmers Baustofftechnik GmbH, „Gebäudeinstandsetzung / Qualitätssicherung durch Fachkompetenz 04“, 2004, pp. 9-40, 147-151, 167-189
- [115] Remmers Baustofftechnik GmbH, „Gebäudeinstandsetzung / Qualitätssicherung durch Fachkompetenz 05“, 2005, pp. 45-54, 72-84
- [116] Remmers Baustofftechnik GmbH, „Gebäudeinstandsetzung 09“, 2009, pp. 137-201
- [117] Bernhard Remmers Akademie, „Gebäudeinstandsetzung 11“, 2011, pp. 8-25, 63-120
- [118] Venzmer H., Trockenlegung, Aktuelle Entwicklung der Bauwerkstrockenlegung, Verlag Bauwesen, Berlin, 2003, p. 278
- [119] Venzmer, H. (Hrsg), *Europäischer Sanierungskalender 2006: für Holz- und Bautenschutz in Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*, Fraunhofer IRB Verlag, 2006, pp. 146-162, 206-215.
- [120] Venzmer, H. (Hrsg), *Europäischer Sanierungskalender 2007, Für Holz- und Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege*, Beuth-Verlag, Berlin, 2007, p. 496.
- [121] Venzmer, H. (Hrsg), *Europäischer Sanierungskalender 2008, Für Holz- und Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege*, Beuth Verlag, Berlin, 2008, pp. 7-40, 41-51, 53-59.
- [122] Venzmer, H. (Hrsg), *Europäischer Sanierungskalender 2009: Lehm- und Bautenschutz, Bauwerksdiagnostik, Sachverständigentätigkeit, Restaurierung, Denkmalpflege*, Beuth-Verlag, Berlin, 2009, p. 484.
- [123] Venzmer, H., *Altbauinstandsetzung 7/8, Injektionsmittelanwendungen zur nachträglichen horizontalen Bauwerksabdichtung*, Dahlberg-Kolloquium (Hrsg.), Huss-Medien, Berlin, 2004.
- [124] Deutsches Institut für Normung, „DIN 15148 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen,“ Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [125] Krüss, Application Report AR244D, *Charakterisierung mikroskopische kleiner Oberflächen*, Hamburg, 2005.
- [126] Krüss, Application Report AR235D, Hamburg, 2003.
- [127] Krüss, Application Report AR 230D, *Charakterisierung von schmutzabweisenden Beschichtungen*, Hamburg, 2002.
- [128] Krüss, Application Report AR 229D, Contact angle measurement on large surfaces, Hamburg, 2002.
- [129] Bracco, G. / Holst, B. (Hrsg), *Surface Science Techniques*, Springer Verlag, Berlin, 2013, pp. 663.
- [130] Krüss, Drop Shape Analyzer - DSA25, Hamburg, 2018.
- [131] Krüss, Technical Note TN312D, *Praxis der Kontaktwinkelmessung*, Hamburg, 2007.
- [132] Viel B., *Strukturiertes Kolloidpartikel für ultrahydrophobe, schmutzabweisende Oberflächen TU Darmstadt*, 2007, Dissertation.
- [133] Krüss, ADVANCE Software, *Software*, Krüss, Hrsg., Hamburg, 2018.
- [134] Krüss, *Schulung / Theorie _ Glossar _ Kontaktwinkel*, Hamburg, 2017.
- [135] Neisius Bautenschutzprodukte, *CavaStop300*, K. Neisius Bautenschutzprodukte (Hrsg.), Kühlungsborn, 2009, Merkblatt.
- [136] Remmers Baustofftechnik GmbH, *Technisches Merkblatt Produkt-Nr. 1810, Kiesol, Lönningen*, 2008, Merkblatt
- [137] Köster Abdichtungssysteme, *Köster Crisin 76 Konzentrat*, K. Abdichtungssysteme, Hrsg., Aurich, 2015 Technisches Merkblatt M 279.
- [138] Köster Abdichtungssysteme, *Horizontalsperren gegen aufsteigende Feuchtigkeit*, Technisches Merkblatt , Köster Bauchemie (Hrsg), Aurich, 2015, Merkblatt
- [139] TROTEC, *Feuchtemessgerät T2000, Praxishandbuch Feuchtemessung*, Heinsberg, 2005 Bedienungsanleitung.
- [140] Gai, P.L., *In-Situ Microscopy in Materials Research*, Bd. 1, P. Gai, (Hrsg.), Springer Science+Business Media New York, 1997, pp. 336.
- [141] Gai P. L. / Boyes E. D., *Environmental high resolution electron microscopy in materials science*, In: Gai P. L. (Hrsg.) *In-Situ Microscopy in Materials Research*, Springer, Boston, 1997, pp. 123 -147.
- [142] Guikema, J.-W., *Scanning Hall Probe Microscopy of Magnetic Vortices in Very Underdoped yttrium-barium-copper-oxide*, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, 2004
- [143] Colliex Ch. *Elektronenmikroskopie, Eine anwendungsbezogene Einführung*, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2008.
- [144] Reimer L., Pfefferkorn G. *Raster- Elektronenmikroskopie*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1977.
- [145] Eggert F. *Standardfreie Elektronenstrahl-Mikroanalyse (mit dem EDX im Rasterelektronenmikroskop)*, Books on Demand, Norderstedt, 2005.
- [146] Körber P./ Venzmer H. „*Rasterelektronenmikroskopische Nachweise von Injektionsmitteln in Mörtel- und Ziegelstrukturen unter Nutzung von Betaungsvorgängen*, in *Energielieferant Altbau*, B.Schmidt, D.Schmidt, H.Venzmer (Hrsg)“ Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [147] *Der Bauschaden Spezial, Feuchteschutz in der AltbauSanierung*, Forum Verlag Hekert, Merching, 2017, p. 200.
- [148] Fraunhofer IPA, *Einrichtungen zur Prüftechnik und Analytik der Abteilung Beschichtungssystem- und Lackiertechnik, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA*, 2016 Broschüre.

- [149] Jancsár I., Iványi A. Phenomenological hysteresis model for vapor-liquid phase transitions, *Pollack Periodica*, Vol. 3, No. 1, 2008, pp. 5-28.
- [150] Harten, U., *Physik Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014, pp. 369.
- [151] Kamps, S., *Untersuchungen u. Herstellung von hydrophoben und superhydrophoben Beschichtungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch dauerhafte Tropfenkondensation*, TU Darmstadt, 2012, Dissertation, p.149
- [152] Dufek M., FEI Company, *The Quanta FEG 450, SEM / ESEM User Operation Manual*, 2013, p.7-88
- [153] Fischer T., FEI, *Quanta FEG 450*, T. Fisher (Hrsg.), 2013.
- [154] Krüss, *Mobile Surface Analyzer - MSA*, KRÜSS, Hrsg., Hamburg, 2018 Broschüre.
- [155] Blachnik, B., *Zusatzmittel in Putzmörteln - Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und Auslaugung-*, Siegen, 2001 Dissertation, p. 132
- [156] Schlosser, J., *Wissenschaftliche Arbeiten schreiben mitp*, Frechen, 2016, p. 287.
- [157] Kornmeier, M., *Wissenschaftlich schreiben leicht gemacht*, UTB GmbH, Stuttgart, 2016, p. 352.
- [158] Fügert, N., Richter, U.A., *Wissenschaftlich arbeiten und schreiben*, Klett Verlag, Stuttgart, 2016.
- [159] Standop, W., Meyer, M., *Die Form der wissenschaftlichen Arbeit*, Quelle und Meyer Verlag, Stuttgart 2004, p. 221.

III. Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: a) Illustration zur Ausgleichsfeuchte; b) W-Werte unterschiedlicher Materialien..... | 4 |
| Abbildung 2: a) Sorptions- Isotherme einiger Baustoffe; b) Ausgleichsfeuchte- Werte gem. DIN 4108 T4 bei RH = 50% | 4 |
| Abbildung 3: Sorptionsdiagramm Kalksandstein | 5 |
| Abbildung 4: a) bis c): REM- Aufnahmen der Porenstruktur von Ziegelproben Z, unbehandelt | 6 |
| Abbildung 5: a) bis c): REM- Aufnahmen der Porenstruktur von Mörtelproben M, unbehandelt | 7 |
| Abbildung 6: Skizzenhafte Erläuterung zu den unterschiedlichen Porenarten eines kapillaren Stoffes | 7 |
| Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmemechanismen und Porengröße | 8 |
| Abbildung 8: Porengrößenverteilung von mineralischen Baustoffen | 8 |
| Abbildung 9: a) Zusammenhang zwischen Kapillarität und Porenradius; b) Wasseraufnahmevermögen von Baustoffen..... | 8 |
| Abbildung 10: Durchfeuchtungsprofile von Mauerwerken | 11 |
| Abbildung 11: Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt..... | 12 |
| Abbildung 12: Aufsteigende Feuchte | 13 |
| Abbildung 13: a) bis f) Folgen langanhaltender aufsteigender Mauerwerksfeuchte mit einhergehender Salzbelastung..... | 14 |
| Abbildung 14: a) Konzentration von Salzen auf der Wandoberfläche einer lang anhaltend durchfeuchteten Mauerwerkswand | 14 |
| Abbildung 15: Die wichtigsten bauschädlichen Salze im Überblick..... | 15 |
| Abbildung 16: Einteilung der Abdichtungsarten nach der graphischen Darstellung der Lastfälle | 16 |
| Abbildung 17: Systematische Darstellung der einreihigen und zweireihigen Bohrlochinjektion..... | 18 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 18: Wirkmechanismen von Injektionsmitteln zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung..... | 19 |
| Abbildung 19: Physikalische Darstellung von Hydrophilie und Hydrophobie | 20 |
| Abbildung 20: Drucklose Bohrlochinjektion, Transportmechanismus: Schwerkraft..... | 21 |
| Abbildung 21: Druckinjektion, Transportmechanismus: Pumpendruck | 21 |
| Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bohrlöcher und der geplanten Injektionsmittelausbreitung | 22 |
| Abbildung 23: Ausbreitungsmaße / Bohrlochabstände ideal | 25 |
| Abbildung 24: Ausbreitungsmaße zu gering / Bohrlochabstände zu weit | 26 |
| Abbildung 25: Ausbreitungsmaße zu gering / Bohrlochabstände zu weit / Ausbreitung geometrisch deformiert | 27 |
| Abbildung 26: a) & b) Ziegel nach Injektionsmittelanwendung mittig aufgetrennt, IM- Ausbreitung geometrisch deformiert | 27 |
| Abbildung 27: Darstellung einer flächigen Injektion (Schleierinjektion) und einer Injektion..... | 32 |
| Abbildung 28: Tropfenkontur erzeugt durch einen Grey Level Scan | 33 |
| Abbildung 29: a) Modell für das Eindringen eines Tropfens in poröser Feststoffmatrix | 40 |
| Abbildung 30: a) Zusammenstellung des Prüfablaufs b) Prüfkörper drucklose Injektion c) Prüfkörper Druckinjektion | 44 |
| Abbildung 31: a) Abdichtungsqualität in Messachse 4, b) Prüfkörper Prüfung nach BuFAS Merkblatt | 46 |
| Abbildung 32: a) Verteilung des Injektionsmittels im Verlauf der Fugen eines Mauerwerks, b) Aufbau einer Mehrstufeninjektion | 47 |
| Abbildung 33: Berechnung des Wirkungsgrades des Injektionsmitteleinsatzes..... | 47 |
| Abbildung 34: W- Wert der Ziegel-Probe V..... | 51 |
| Abbildung 35: Einordnung der Messergebnisse des w-Wertes | 51 |
| Abbildung 36: Illustration der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit..... | 51 |
| Abbildung 37: Prinzip der Kontaktwinkelmessung | 52 |
| Abbildung 38: Erläuterung der Youngschen Gleichung..... | 53 |
| Abbildung 39: Illustration der Auswertung einer Kontaktwinkelmessung im Tangentenverfahren | 53 |
| Abbildung 40: a) & b) Fortschritt- und Rückzugswinkel | 54 |
| Abbildung 41: a) bis c) Zeitraffer- Aufnahmen / -Diagramme einer Tröpfchenbildung auf einer strukturierten Oberfläche | 55 |
| Abbildung 42: Grenzfälle der Benetzung: a) =>homogen nach Wenzel, b) =>heterogen nach Cassie | 56 |
| Abbildung 43: Kontaktwinkelmessung mit der Höhen-Breiten Methode..... | 56 |
| Abbildung 44: Kontaktwinkelbestimmung durch die Messung Tropfendurchmessers | 57 |
| Abbildung 45: a) & b) Beispiele anhand eines Tropfenaufsetztests: a) Oberfläche ist hydrophob, b) Oberfläche ist hydrophil. | 57 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 46: Probenpool für Stufe 1, bestehend aus 122 Ziegel-, Mörtel- und Mauerwerksproben..... | 60 |
| Abbildung 47: a) bis o): Fotos vom Versuchsaufbau des hiesigen Injektionsmittelversuchs an 122 Proben: Stufe 1..... | 63 |
| Abbildung 48: Versuchsanordnung Stufe 1a: => Systematische, skizzenhafte Erläuterung..... | 64 |
| Abbildung 49: a) bis f): Fotos vom Versuchsaufbau in Stufe 1a im Labor..... | 65 |
| Abbildung 50: Detailskizze zur Versuchsdurchführung in Stufe 1a..... | 66 |
| Abbildung 51: Phasendiagramm..... | 77 |
| Abbildung 52: Schaubild: Funktionsgruppen ESEM..... | 77 |
| Abbildung 53: Schaubild: Funktion Kühl Tisch ESEM..... | 77 |
| Abbildung 54: Schaubild: Kühl Tisch ESEM..... | 78 |
| Abbildung 55: a) bis f) Verwendetes ESEM HS Wismar, University of Technology, Business and Design, Stufe 2..... | 78 |
| Abbildung 56: a) bis h) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM: Material =>ZIEGEL..... | 79 |
| Abbildung 57: i) bis p) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM: Material =>ZIEGEL..... | 80 |
| Abbildung 58: q) bis v) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM: Material =>ZIEGEL..... | 81 |
| Abbildung 59: a) bis d) =>Untersuchung des Hydrophobierungsfilm im REM: Material =>MÖRTEL..... | 82 |
| Abbildung 60: Untersuchung des Hydrophobierungsfilms im REM: Material =>ZIEGEL, Einfärbung des Hydrophobierungsfilms..... | 82 |
| Abbildung 61: a) IM 2I_DL, D(g) 30% an einer Mörtelprobe =>Hydrophobierungsfilm, b) Ziegelprobe mit Hydrophobierungsfilm..... | 83 |
| Abbildung 62: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil =>sofortige Wasserfilmbildung..... | 84 |
| Abbildung 63: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil =>Tropfenbildung deutlich < 90°..... | 85 |
| Abbildung 64: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel/Mörtel, hydrophob =>Tropfenbildung deutlich > 90°..... | 86 |
| Abbildung 65: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel/Mörtel, hydrophob =>Tropfenbildung deutlich > 90°..... | 87 |
| Abbildung 66: a) & b): Untersuchung im ESEM: Ziegel, superhydrophob =>Tropfenbildung deutlich > 150°..... | 87 |
| Abbildung 67: a) bis o): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung..... | 88 |
| Abbildung 68: a) bis o): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung..... | 89 |
| Abbildung 69: a) bis f): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung..... | 90 |
| Abbildung 70: a) bis ab): Untersuchung im ESEM: Ziegel, hydrophil => unmittelbare Wasserfilmbildung..... | 91 |
| Abbildung 71: Direkte Messung des Kontaktwinkels a) im ESEM (180° - 128,7° =>51,3°), b) im ESEM- Bild (180° - 90,7° =>89,3°)..... | 92 |
| Abbildung 72: a) & b) Geometrische- Tropfen- Kontur- Analyse und Tangentenverfahren..... | 93 |
| Abbildung 73: a) & b): Proben IM 2_DL_V: Beziehungen Kontaktwinkel zu => Faktor $[A * \sqrt{t}]$, => w-Wert, makroskopisch..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 74: Grundlage für die rechnerische Ermittlung von w-Werten und Wassergehalten | 94 |
| Abbildung 75: Rechnerische Ermittlung von w-Werten und Wassergehalten zugehörig zu den ESEM-Kontaktwinkeln..... | 94 |
| Abbildung 76: Beziehungen Kontaktwinkel =>w-Wert / =>Wassergehalt / =>RH- Wert, gesamtes ESEM- Messprogramm | 95 |
| Abbildung 77: Matrix zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Nachweisverfahren..... | 101 |
| Abbildung 78: Örtlicher Einsatz von Kontaktwinkelmessung mit dem Mobile Surface Analyzer | 102 |

IV. Verzeichnis der Formeln

| | |
|---|----|
| Formel 1: maximale kapillare Wasseraufnahme | 9 |
| Formel 2: Kapillarer Durchfeuchtungsgrad | 9 |
| Formel 3: Maximale Wasseraufnahme (Sättigungsfeuchte)..... | 9 |
| Formel 4: Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme | 9 |
| Formel 5: Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad | 10 |
| Formel 6: kapillare Steighöhe aufsteigender Feuchte | 20 |
| Formel 7: Abdichtungsqualität, definiert durch BuFAS, Quelle: BuFAS Ingenieurmerkblatt | 24 |
| Formel 8: Reduzierkoeffizienten Abdichtungsqualität, definiert durch BuFAS, Quelle: BuFAS Ingenieurmerkblatt | 25 |
| Formel 9: Wassereindring-Koeffizient..... | 50 |
| Formel 10: Wassereindringwert: w-Wert..... | 50 |
| Formel 11: Grenzflächenspannung zwischen fest und gasförmig..... | 52 |
| Formel 12: Youngsche Gleichung zur Berechnung des Kontaktwinkels | 52 |
| Formel 13: Formel für die Kontaktwinkelhysterese..... | 55 |
| Formel 14: Kontaktwinkelmessung nach der $\theta / 2$ -Methode..... | 57 |
| Formel 15: Für die rechnerische Modellierung verwendete Lineare Funktionen..... | 93 |

V. Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Böden mit einem k_f Wert von 10^{-4} bis 10^{-6} sind ausreichend durchlässig..... | 17 |
| Tabelle 2: Drucklose Injektion =>Wirkmechanismus Schwerkraft / Kapillarität, Quelle: WTA 4-10-15/D | 23 |
| Tabelle 3: Druck- Injektion =>Wirkmechanismus Pumpendruck, Quelle: WTA 4-10-15/D | 23 |
| Tabelle 4: Auflistung von Daten zum Chemismus, der Wirkweise und zu den Inhaltsstoffen der hier verwendeten Injektionsmittel | 62 |
| Tabelle 5: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 1..... | 67 |
| Tabelle 6: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 2..... | 67 |
| Tabelle 7: Messergebnisse Datenloggermessungen und ESEM- Kontaktwinkel an 5 Proben, Stufe 2..... | 72 |

VI. Diagrammverzeichnis

| | |
|--|----|
| Diagramm 1: Ergebnisse w- Werte für M und Z aufgegliedert auf die untersuchten Injektionsmittel..... | 68 |
| Diagramm 2: Ergebnisse w- Werte für A und V aufgegliedert auf die untersuchten Injektionsmittel..... | 68 |
| Diagramm 3: Ergebnisse aller 122 w- Werte für M, Z, A und V unterteilt in hydrophob und hydrophil..... | 69 |
| Diagramm 4: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 1 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert | 69 |
| Diagramm 5: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 2_D (Druck) zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert | 70 |
| Diagramm 6: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 2_DL (drucklos) zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert | 70 |
| Diagramm 7: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 3 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch und w-Wert..... | 71 |
| Diagramm 8: Verhältnis des angewandten Injektionsmittels IM 3 zwischen Kontaktwinkeln makroskopisch und der IM-Ausbreitung..... | 71 |
| Diagramm 9: Ergebnisse der Datenloggermessungen | 73 |
| Diagramm 10: Ergebnis ESEM Kontaktwinkel- Messungen in Beziehung zu den Datenloggermessungen und w-Werten..... | 74 |
| Diagramm 11: Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe V1: ESEM- Kontaktwinkel =>w-Wert, =>Wassergehalt, =>RH- Wert..... | 74 |
| Diagramm 12: Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe V5: ESEM- Kontaktwinkel =>w-Wert, =>Wassergehalt, =>RH- Wert..... | 75 |
| Diagramm 13: Injektionsmittel IM 3 an der Probe Z29: ESEM- Kontaktwinkel =>w-Wert, =>Wassergehalt, =>RH- Wert..... | 75 |
| Diagramm 14: Injektionsmittel IM 3 an der Probe A27: ESEM- Kontaktwinkel =>w-Wert, =>Wassergehalt, =>RH- Wert..... | 75 |
| Diagramm 15: Injektionsmittel IM 2_DL an der Probe A12: ESEM- Kontaktwinkel =>w-Wert, =>Wassergehalt, =>RH- Wert..... | 76 |

VII. Konsultationen

Betreuerin 1: Dr. habil. Erzsébet Szeréna Zoltán, University of Pécs, Marcell Breuer Doctoral School
associate professor

Betreuerin 2: Dr. Adél Len, University of Pécs, Marcell Breuer Doctoral School, assistant professor

VIII. Ehrenwörtliche Erklärungen

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.

Springe / Pécs, _____

Unterschrift Peter Körber M.Sc.

IX. Danksagung

Für die Nutzung des Labors der Hochschule Wismar, Fakultät Bauingenieurwesen möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich Herrn Prof. Dr. Malorny und Herrn Dr. Barfels danken.

Insbesondere möchte ich dem Initiator des Doktorandenkollegs an der HS Wismar und Studiengangsleiter des Studiengangs Master Bautenschutz der WINGS, Herrn Prof. Dr. Dr. habil. H. Venzmer danken.

Und schließlich möchte ich meiner Familie für die mir während der Arbeit entgegengebrachte Geduld bedanken.

X. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Peter Körber
Geburtsdatum / -ort: 12.03.1966 in Hannover
Nationalität: Deutsch
E-mail: kontakt@architekt-koerber.de

Abgeschlossene Berufsausbildung:

1984 - 1986 Ausbildung zum Zimmerer, Hannover
1986 Gesellenbrief Zimmerergeselle

Abgeschlossene Hochschulausbildung / Beruflicher Werdegang:

1988 - 1992 Studiengang Architektur, HAWK Hildesheim, FB Architektur
1992 Dipl. Ing._(FH) Architekt
1994 Mitglied der Architektenkammer Niedersachsen
2003 öffentliche Bestellung und Vereidigung: Schäden an Gebäuden
2005 Selbständig: Ingenieur- und Sachverständigenbüro Körber
2008 öffentliche Bestellung und Vereidigung: Wertermittlung Gebäude/ Grundstücke
2010 TEGoVA Recognised European Valuer, REV
2011 - 2014 Studiengang Bautenschutz, HS Wismar, Fakultät Bauingenieurwesen
2014 Master of Science Bautenschutz, M.Sc.
2013 Mitglied der Ingenieurkammer Niedersachsen, Beratender Ingenieur IK Nds
2014 - 2018 PHD
Doktorandenkolleg HS Wismar, Fakultät Bauingenieurwesen und
University of Pécs, Marcell Breuer Doctoral School, Faculty of engineering and
information technology

2. Anlagenverzeichnis

- Anlage 01: Probenpool für Stufe 1, 122 Ziegel-, Mörtel- und Mauerwerksproben
- Anlage 02: Fotos vom Versuchsaufbau des Injektionsmittelversuchs, Stufe 1
- Anlage 03: Fotos vom Versuchsaufbau in Stufe 1a im Labor
- Anlage 04: Detailskizze zur Versuchsdurchführung in Stufe 1a
- Anlage 05 a: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 1
- Anlage 05 b: Ergebnisse Versuch Stufe 1, makroskopisch, Teil 2
- Anlage 06 aa: Ergebnisse w- Werte für M
- Anlage 06 ab: Ergebnisse w- Werte für Z
- Anlage 06 ba: Ergebnisse w- Werte für A
- Anlage 06 bb: Ergebnisse w- Werte für V
- Anlage 07: Ergebnisse aller 122 w- Werte für M, Z, A und V
- Anlage 08 a: Verhältnis IM 1 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch / w-Wert
- Anlage 08 b: Verhältnis IM 2_D zwischen Kontaktwinkel makroskopisch / w-Wert
- Anlage 08 c: Verhältnis IM 2_DL zwischen Kontaktwinkel makroskopisch / w-Wert
- Anlage 08 d: Verhältnis IM 3 zwischen Kontaktwinkel makroskopisch / w-Wert
- Anlage 09: Verhältnis IM 3 zwischen Kontaktwinkeln makroskopisch / IM-Ausbreitung
- Anlage 10: Messergebnisse Datenlogger / ESEM- Kontaktwinkel an 21 Proben, Stufe 2
- Anlage 11 a: Ergebnisse der Datenloggermessungen an Probe V5: RH-Werte
- Anlage 11 b: Ergebnisse der Datenloggermessungen an Probe V1: RH-Werte
- Anlage 11 c: Ergebnisse der Datenloggermessungen an Probe Z29: RH-Werte
- Anlage 11 d: Ergebnisse der Datenloggermessungen an Probe A27: RH-Werte
- Anlage 11 e: Ergebnisse der Datenloggermessungen an Probe A12: RH-Werte
- Anlage 12: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel in Beziehung zu RH-Werten / w-Werten
- Anlage 13 a: IM 2_DL an V1: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel / RH / w-Wert / Wasserg.
- Anlage 13 b: IM 2_DL an V5: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel / RH / w-Wert / Wasserg.
- Anlage 13 c: IM 3 an Z29: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel / RH / w-Wert / Wasserg.
- Anlage 13 d: IM 3 an A27: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel / RH / w-Wert / Wasserg.
- Anlage 13 e: IM 2_DL an A12: Ergebnis ESEM- Kontaktwinkel / RH / w-Wert / Wasserg.
- Anlage 14: ESEM Hochschule Wismar, Faculty of engineering
- Anlage 15 a: Messung des Kontaktwinkels im ESEM, Beispiel $\Rightarrow 180^\circ - 128,7^\circ = 51,3^\circ$
- Anlage 15 b: Messung des Kontaktwinkels im ESEM, Beispiel $\Rightarrow 180^\circ - 120,6^\circ = 59,4^\circ$
- Anlage 15 c: Messung des Kontaktwinkels im ESEM, Beispiel $\Rightarrow 180^\circ - 90,7^\circ = 89,3^\circ$
- Anlage 15 d: Messung des Kontaktwinkels im ESEM, Beispiel $\Rightarrow 180^\circ - 69,4^\circ = 110,6^\circ$

- Anlage 16 a: Rechnerische Modellierung: IM 1 _ Proben A
- Anlage 16 b: Rechnerische Modellierung: IM 2_D _ Proben A
- Anlage 16 c: Rechnerische Modellierung: IM 2_DL _ Proben A
- Anlage 16 d: Rechnerische Modellierung: IM 3 _ Proben A
- Anlage 16 e: Rechnerische Modellierung: IM 1 _ Proben M
- Anlage 16 f: Rechnerische Modellierung: IM 2_D _ Proben M
- Anlage 16 g: Rechnerische Modellierung: IM 2_DL _ Proben M
- Anlage 16 h: Rechnerische Modellierung: IM 3 _ Proben M
- Anlage 16 i: Rechnerische Modellierung: IM 2_DL _ Proben V
- Anlage 16 j: Rechnerische Modellierung: IM 1 _ Proben Z
- Anlage 16 k: Rechnerische Modellierung: IM 2_D _ Proben Z
- Anlage 16 l: Rechnerische Modellierung: IM 2_DL _ Proben Z
- Anlage 16 m: Rechnerische Modellierung: IM 3 _ Proben Z
- Anlage 17: Ergebnisse Stufe 2: Rechnerische Ermittlung w-Werte / Wassergehalten
- Anlage 18: Ergebnisse ESEM-Kontaktwinkel =>w-Werte / =>Wassergeh. / =>RH- Werte
- Anlage 19: Matrix zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Nachweisverfahren
- Anlage 20 a - c: Technisches Datenblatt verwendeter Mauermörtel
- Anlage 21: Verwendete Injektionspumpe, Fa. Desoi
- Anlage 22 a - d: Verarbeitungsrichtlinie Kiesol von Fa. Remmers, IM 2
- Anlage 23 a - b: Verarbeitungsrichtlinie Crisin C76 von Fa. Köster , IM 3
- Anlage 24: Verarbeitungsrichtlinie Cavastop, IM 1